



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

침투 시설에서 충전재 특성에 따른 침투 및 증발 거동

Infiltration and Evaporation Behavior of
Infiltration Facilities According to the
Characteristics of Filling Material

2019년 08월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

정 주 호

침투 시설에서 충전재 특성에 따른 침투 및 증발 거동

지도교수 한 무 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 08월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

정 주 호

정주호의 공학석사 학위논문을 인준함

2019년 08월

위 원 장 _____ 최 용 주 (인)

부위원장 _____ 한 무 영 (인)

위 원 _____ 최 정 권 (인)

국 문 초 록

급격한 도시화로 인한 불투수면 증가로 야기된 도심 홍수 및 가뭄 문제는 빗물 관리의 중요성을 대두시키고 있다. 이로 인해 다양한 기술 개발이 이루어지고 있는데 이 중 침투 시설의 설치는 빗물 관리의 필수적인 요소이다. 침투 시설의 목적은 주로 지하수 함양, 식생 환경 개선, 일시 저류를 통한 열섬 현상 저감 등이다.

기존의 연구는 주로 침투 시설의 지하수 함양 효과를 유역 단위로 모델링하고 예측하는데 주를 이루었고, 기타 기능에 관한 연구는 침투 시설의 한 종류인 투수 블록의 온도 저감 효과가 연구되었다. 따라서 본 연구는 침투 시설의 인자인 쇄석을 변화시켜 실제 시설에 따른 투수 거동을 확인하고, 증발 실험을 통해 시설의 쇄석에 인한 영향을 극대화시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

본 연구는 침투 시설의 인자인 쇄석, 강우 인자인 유입 속도, 토양 인자인 초기 함수비를 변화시켜 침투 실험을 수행하였으며, 그에 따른 침투 거동을 분석하였다. 실험 결과 쇄석 종류에 따른 침투속도 및 침투량의 변화는 존재하나 그 효과가 미미하고 깊이가 깊어질수록 침투 시설에 의한 영향이 줄어들음을 알 수 있었다. 강우 인자인 유입 속도에 따른 실험 결과도 같은 결과를 보였으며, 토양 인자인 초기 함수비의 경우에는 함수비가 최적 함수비에 도달하기 전까지는 동일한 결과를 보였다. 증발 실험의 경우 골재에 유입된 물의 양이 포화, 혹은 일부 포화 상태 일 때에 증발량, 증발 잠열 flux, 온도 모두 BLA의 경우와 gravel의 경우가 비슷한 값으로 그 차이가 미미하였다. 그러나 자유수면이 존재하지 않고 공극 내의 물만 존재하는 불포화 상태의 경우 증발량과 증발 잠열 flux 모두 BLA를 사용하였을 때 높은 값을 보였고 대기 온도의 경우 BLA의 값이 낮음을 확인했다.

본 실험 결과를 통하여 침투 시설의 사이즈, 내부 채움재 등 시설의 특성을 변화시켜 침투 능력을 개선하는 것은 그 한계점이 존재하고,

시설 특성 변화를 통하여 증발 능력은 유의미한 개선 효과가 있음을 확인했다.

주요어 : 침투 시설, 침투, 증발, 잠열, 빗물 관리

학 번 : 2017-21274

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경	1
제 2 절 연구의 목적	3
제 2 장. 문 헌 연 구	4
제 1 절 빗물 침투 및 증발	4
1. 빗물 침투 특성	4
2. 빗물 침투 시설	5
3. 빗물의 증발 특성	7
제 2 절 인공 경량 골재	10
1. 경량 골재 특성	10
2. 경량 골재의 적용	14
제 3 장. 실험 장치 및 방법	15
제 1 절. 골재 특성 분석	15
1. 골재 물성치 비교	15
2. X-ray CT를 통한 골재 공극 분석	17
제 2 절. 실험 장치	23
1. 침투 실험	23
2. 증발 실험	26
제 3 절. 실험 방법	28
1. 골재 특성에 따른 침투 실험	28
2. 골재 특성에 따른 증발 실험	30

제 4 장. 실험 결과 및 고찰..... 33

제 1 절. 골재 특성에 따른 침투 능력.....33

1. 골재에 따른 침투 능력 측정.....33

2. 유입속도에 따른 침투 능력 측정.....35

3. 초기함수비에 따른 침투 능력 측정.....37

제 2 절. 골재 특성에 따른 증발 능력.....40

1. 포화 상태에서의 증발.....40

2. 중간 포화 상태에서의 증발.....43

3. 불포화 상태에서의 증발.....46

제 5 장. 결론..... 50

참고 문헌..... 53

표 목차

Table 1. Bottom ash 입자의 물리적 성질.....	10
Table 2. 저회 경량 골재 (BLA) 성분 분석 결과	11
Table 1. 인공 경량 골재 (ALA) 성분 분석 결과	12
Table 2. 저회경량골재 (BLA) 유해성분검출 결과	13
Table 3. Physical Characteristic of Aggregates	16
Table 4. Particle size distribution of BLA and Gravel	16
Table 5. Physical property of Joomunjin Sand	24

그림 목차

Figure 1. urban heat island phenomena	1
Figure 2. 중국의 빗물 관리 국가 프로젝트 ‘Sponge City’ 개념도 ..	2
Figure 3. 빗물 침투 시설의 종류 (김이호 et al, 2013)	6
Figure 4. Pore diagram of a grain (Shahraeeni and Or, 2010)	8
Figure 5. bottom ash로 생산되는 경량 골재 (원: BLA, 오: ALA)	14
Figure 6. (Vibratory Sieve Shaker, SS-10 Gilson)	15
Figure 7. Particle Size Distribution of BLA(경량골재), Gravel (일반 쇄석).....	17
Figure 8. diagram of X-ray Computer Tomography (CT)	18
Figure 9. X-ray Microscope (ZeISS Xradia 520 Verssa)	19
Figure 10. 3D image of BLA.....	19
Figure 11. 3D image of Gravel.....	20
Figure 12. Converted 3D image of BLA to rectangular parallelepiped	20
Figure 13. Inner pore distribution of BLA.....	21
Figure 14. Single fragment of BLA	21
Figure 15. Converted 3D image of Gravel to rectangular parallelepiped	22
Figure 16. Photograph of Infiltration Soil Column.....	23
Figure 17. Grain size distribution of Joomunjin Sand	24
Figure 18. Experiment diagram of infiltration system.....	25
Figure 19. Photograph of evaporation Experiment set up.....	26
Figure 20. Diagram of evaporation experiment set up	27
Figure 21. Relationship between measured weight	30
Figure 22. Relationship between weight of each void in water	

condition	31
Figure 23. Comparison of Infiltration capacity according to filling Material Type.....	33
Figure 24. Total Infiltration Volume at start of overflow	34
Figure 25. Saturation Velocity according to inflow rate	35
Figure 26. Volumetric water content according to inflow rate	36
Figure 27. Saturation Velocity according to initial water content...	37
Figure 28. Volumetric water content according to initial water content.....	38
Figure 29. Cumulative evaporation according to filling material type	40
Figure 30. Latent heat flux of saturated condition.....	41
Figure 31. Comparison of surface temperature according to filling material type	42
Figure 32. Comparison of humid air temperature according to filling material type	42
Figure 33. Comparison of cumulative evaporation according to filling material.....	43
Figure 34. Comparison of latent heat flux according to filling material.....	44
Figure 35. Comparison of surface temperature according to filling material.....	45
Figure 36. Comparison of humid air temperature according to filling material.....	45
Figure 37. Comparison of cumulative evaporation according to filling material.....	46
Figure 38. Comparison of cumulative evaporation rate according to filling material	47
Figure 39. Comparison of latent heat flux according to filling	

material.....	47
Figure 40. Comparison of humid air temperature according to filling	
material.....	48
Figure 41. Comparison of relative humidity according to filling	
material.....	49

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

급격한 도시화로 인한 불투수면 증가는 호우 시 유출량 증대를 야기하고 이는 도심 홍수, 가뭄 등과 같은 수문학적 문제를 일으켰다. 또한 유출된 빗물로 저감된 토양 수분은 지하수 수위 하강 및 식생 환경에 영향을 미칠 뿐 아니라(Kim, Lee and Sung, 2001) 도심에서의 열섬현상 문제의 원인으로 지적되고 있다.(Shokri *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2017)

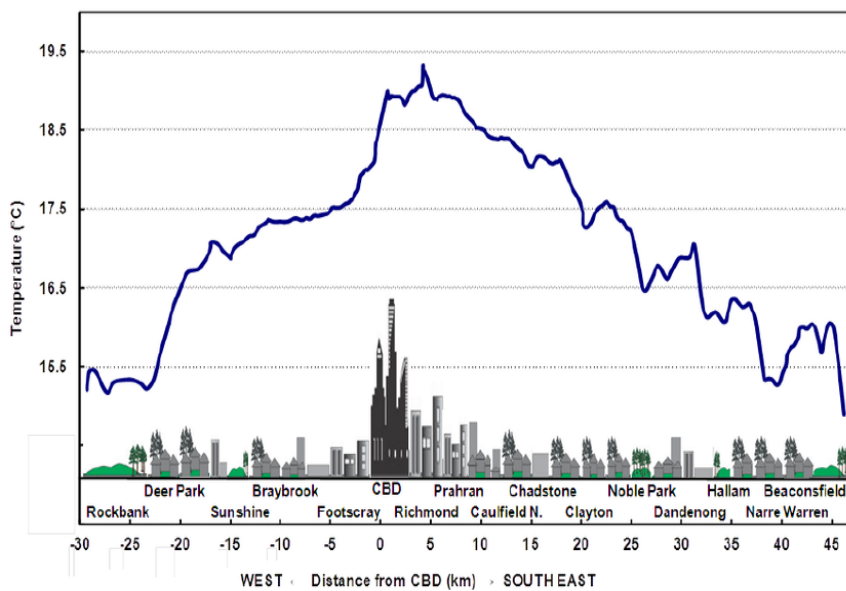


Figure 1. urban heat island phenomena

개발로 인해 저하된 토양 수분은 다양한 환경 영향의 원인이 되어 이를 해결하기 위한 다양한 연구와 세계적인 관심이 집중되고 있다. 중국의 경우 심각한 물 부족으로 인한 가뭄과 동시에 호우 등으로 인한 재난으

로 인한 피해가 커 이를 해결하기 위해 자연재해가 심한 도시를 중심으로 ‘Sponge City’ 프로젝트를 가동했다. 이 프로젝트는 강우 시에 빗물을 최대한 저장하고, 가뭄 시에 최대한 활용하는 데에 그 목적이 있다.(Jia *et al.*, 2017)



Figure 2. “Sponge city project” of China

이러한 빗물 관리 기술, 프로젝트 등에서 필수적인 요소는 토양 수분 충전율을 주요 목표로 하는 침투 시설이다. 침투 시설은 도심 홍수 저감, 지하수 함양, 빗물 이용 등을 목적으로 하고, 현재에는 다양한 디자인으로 설치되어 식생 환경 개선, 증발 촉진 등의 기능을 더하여 설치되고 있다.

침투 시설에 대한 연구는 시설 개발을 통한 빗물 유출 저감 효과 평가와 지하수 함양에 관한 연구가 가장 널리 연구되고 있다.(Cerdà, 1995; Markovič *et al.*, 2014) 그러나 우리나라의 경우 기존의 침투 시설 모형에 크게 벗어나지 않고 현장 유역 단위 같은 규모가 비교적 큰 지역에서의 시설 설치로 인한 효과에 대해서만 진행되고 있는 실정이다. (성종상, 2004)

제 2 절 연구의 목적

본 연구에서는 침투 시설에서 빗물 침투 능력 향상 혹은 저류의 기능을 위해 적용되는 쇄석을 이용하여 실내 실험을 통해 다양한 조건에서의 침투 시설의 침투 능력 특성을 알아보고 침투 시설의 또 다른 목적인 저류를 통한 증발을 실내 실험을 통해 다양한 조건에서의 침투 시설의 증발 능력 특성을 확인했다. 또한 증발 거동을 토대로 열섬 현상 저감의 효과를 예측했다. 세부적인 연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 저류형 침투 시설의 침투 거동을 확인한다. 시설의 조건인 쇄석과 현장 조건인 유입량과 토양의 초기 함수비에 따른 침투 거동을 파악하고, 기존 침투 시설의 기대 효과를 검토한다.

둘째, 저류형 침투 시설의 증발 거동을 확인한다. 침투 시설 내 빗물 저류 목적으로 적용되는 쇄석의 상태를 변화시켜 각 조건 별 증발량, 온도 및 습도 변화를 확인한다. 실험 결과를 토대로 열섬 현상 저감 가능성을 확인한다.

셋째, 실험 결과를 바탕으로 침투 시설의 한계점을 파악하고 기능의 극대화를 위한 설치 방향을 제안한다.

제 2 장 문 헌 연 구

제 1 절 빗물 침투 및 증발

1. 빗물 침투 특성

빗물 침투는 강우 시 지표면에 내린 빗물이 중력, 압력, 온도 등의 다양한 자연적인 인자 또는 인공적인 기술로 토양의 공극 내로 빗물이 이동하는 것이라고 할 수 있다. 토양은 일반적인 흙 입자, 공기, 물, 즉 3상(相)으로 이루어져있다. 흙 입자는 위치와 깊이에 따라 모두 다르고 그 특성이 매우 다양하여 한가지로 단정되지 않고 크기, 거칠기 등의 다양한 인자로 표현된다. 공기는 흙 입자와 또다른 흙 입자 사이의 공간인 공극에 위치하다가 빗물 등 유체가 주입되어 이 공극에 위치한 공기의 자리를 지나가며 밀어내어진다. 즉, 빗물 침투는 토양에서 공극의 상태와 직결된다고 할 수 있다. 실제로 빗물 침투는 토양 지표면에 국부적으로 일어나지 않고 지표면 전체에 작용하므로 토양 내의 공극에 있는 공기가 빗물 침투에 매우 큰 영향을 미친다. 즉, 토양 내의 공극에서도 물의 이동이 이루어 지며, 공극의 특성에 따라 물의 거동이 결정된다.

빗물 침투는 그 특성이 복잡한데 이는 토조 실험에서 포화 토양을 가정하지 않고 불포화 토양에서 진행되기 때문이다. 즉, 토양 내의 공극으로 인한 침투 영향이 매우 크다.

일반적으로 빗물 침투는 지반공학에서는 지반의 응력을 저하시키는 요소로 고려되어 토양 내 공극에 많은 양의 물이 주입되지 않게 하거나 공극의 크기를 줄이는 기술 등이 연구되고 있다. 그러나 환경공학

분야에서는 빗물 침투로 인한 토양의 식생 환경 개선, 지하수 함양, 열섬 현상 저감 등의 지수를 통한 환경 개선의 효과를 기대하여 이를 발전하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 분야에 따른 상이한 연구 방향은 그 목적에 따라 적용이 다르므로 충돌하지 않는다. 지반공학 분야에서는 심도 5m 이상의 지반에서의 토양의 물 거동을 파악하는 반면 환경공학 분야에서는 심도 2m 이하의 지표면에서의 토양 내 물 거동을 파악한다.

2. 빗물 침투 시설

빗물 침투 시설은 최근 도심 환경 문제를 해결하고자 대두되는 저영향 개발 (Low Impact Development) LID 시설의 대표적인 예이다.

빗물 침투 시설은 빗물을 일시 저류 혹은 잔디, 도랑 및 침투관 등을 통하여 빗물의 유출 저감시켜 홍수를 방지하는 목적과 공원, 운동장 등 넓은 면적에 빗물의 저류 기능을 확보하고 지중 침투를 증가 시켜 지하수 위 확보의 목적으로 설치되는 것이 대표적이다. Fig. 3은 침투 시설 종류에 따른 기능에 대한 모식도이다.

침투 시설은 설치 장소에 따라 그 모양과 구조가 변화한다. 주차장, 도로 등 오염 물질이 침투 시설에 들어와 폐색 등의 문제를 일으킬 가능성이 있는 장소에는 비점오염저감기술을 탑재한 시설이 필요하다. 기본적으로 침투 시설은 빗물이 유입되는 유입부, 쇄석 등을 이용하여 공극을 확보하는 침투 및 저류 공간, 시설 용량 이상의 빗물이 빠져나가는 유출부의 구조로 이루어져 있다.

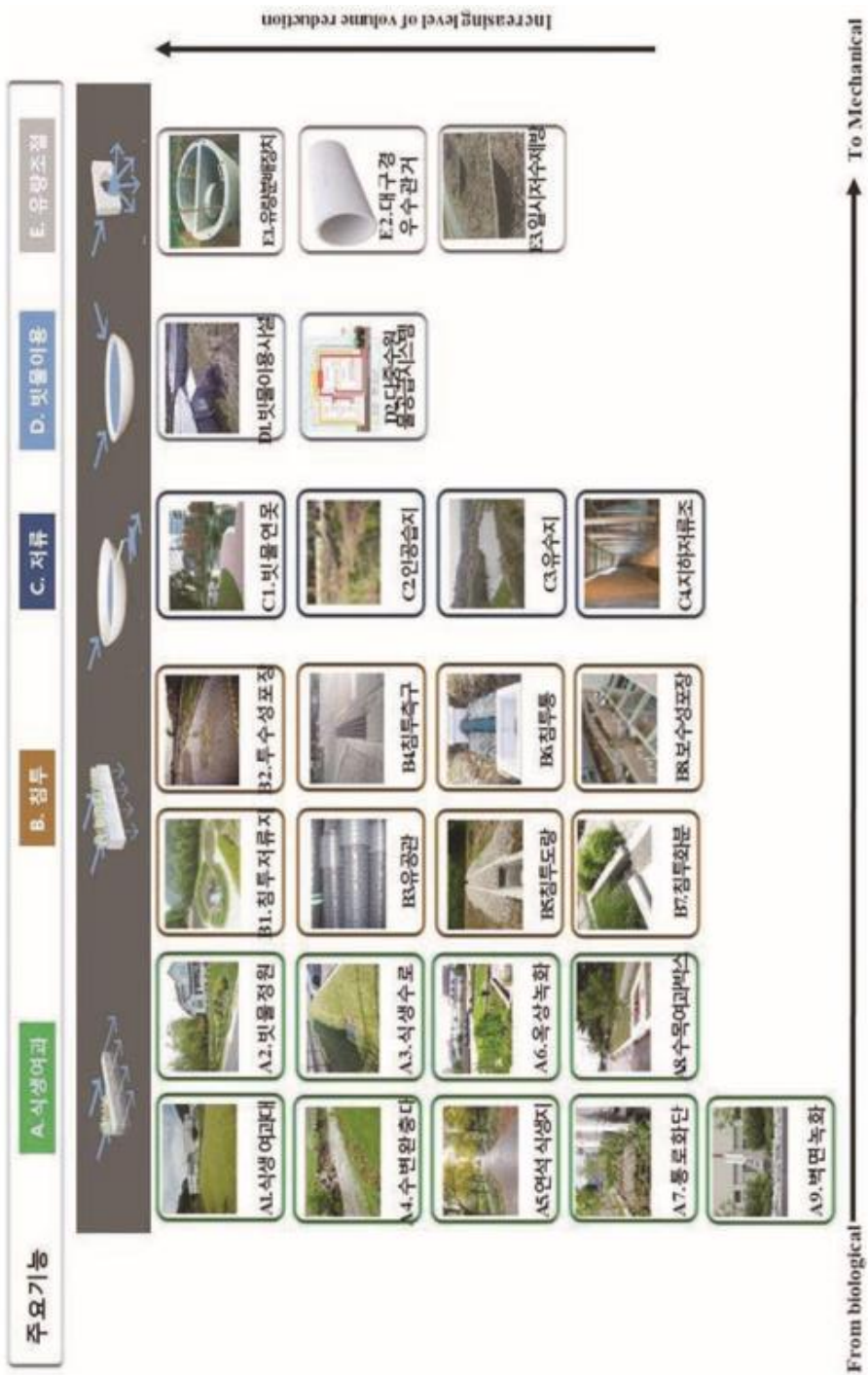


Figure 3. Type of infiltration facility (김이호 et al, 2013)

침투 시설 설치의 중요성이 대두되며 여러 연구가 진행되며 그 효과가 정량적으로 평가되고 있다. 주로 침투 시설의 구조에 따른 침투 능력을 평가하거나, 현장에 대규모 침투 시설 설치 후 빗물 유출량을 하수 관거의 유량 측정을 통해 그 효과를 평가하였다. 침투 시설의 효과에 대하여 아래와 같이 명시 할 수 있다. (Lee *et al.*, 2015; 이태구, 2016)

1. 지하수위 확보
2. 식생 환경 개선
3. 빗물 오염 물질 저감
4. 침투 유출 저감
5. 열섬 현상 저감

침투 시설에 대한 정량적 평가는 크게 현장 설치 후 토양 수분, 하수 관거의 수위 등으로 직접 측정하는 방법과 유역별 영향 인자를 입력시켜 침투 양상을 프로그램을 통해 모델링하여 평가하는 방법으로 나뉘어진다. 그러나 현재까지의 모델링은 현장의 토양 특성을 모두 고려하지 못하고 일부 가정된 인자로 진행되고 있으며, 현장 측정의 경우 시설의 구조 및 용량과 현장 환경의 복잡성으로 인하여 정량적인 효과 평가는 미미한 실정이다.

3. 빗물의 증발 특성

최근 지속 가능한 빗물 관리의 일환으로 자연 상태의 물 순환을 통하여 환경 문제를 해결하고자 하는 움직임이 강하게 작용하고 있다. 강우 후 침투 시설에서 일시 저류 되거나 중력수가 투수 되고 침투 시설의 채석 사이의 공극에 남은 빗물은 증발을 통해 대기 중에 분산되며, 이 물

입자가 모여 다시 강우를 생성하여 물의 순환을 야기하는 개념은 전체 면적보다 소규모의 면적에서 적용되고 있다. (한영해, 2012)

빗물은 침투 시설의 쇄석으로 채워진 공간에 일시 저류 되거나 투수 후 쇄석에 표면장력으로 인하여 일부 남아 무강우 기간에 증발된다. 이때 입자 간의 공극에 작용하는 모관 상승력이 증발을 일으키는 힘이다. 공극의 물리적 특성은 입자의 크기, 입자의 거칠기, 비틀어짐 (tortuosity) 등이 있으며 이러한 특성으로 인해 변화된 공극의 부피가 모관 상승과 직결된다.

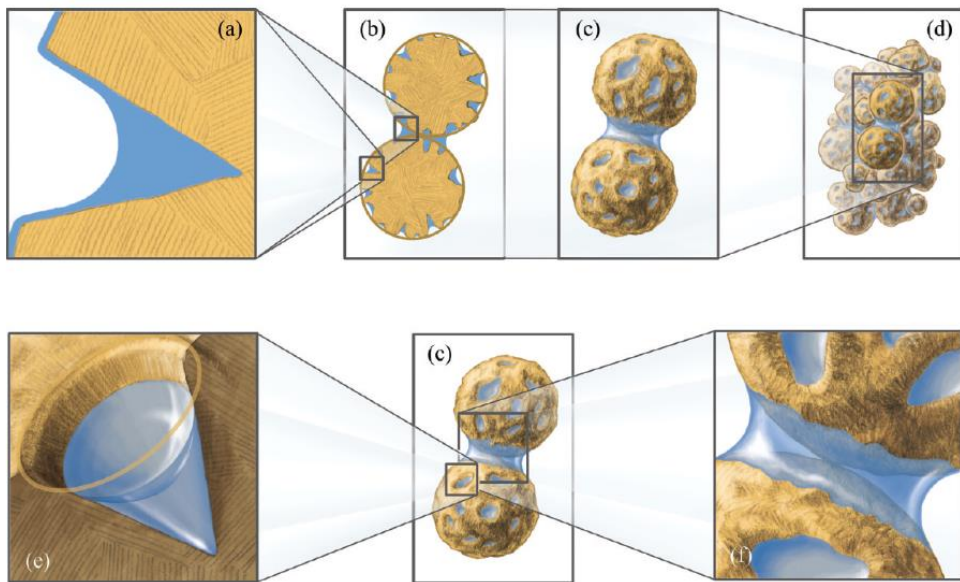


Figure 4. Pore diagram of a grain (Shahraeeni and Or, 2010)

모관 상승고는 다공성 매질에서 물의 거동을 파악할 수 있는 중요한 요소이다. 모관 상승고는 공극의 직경이 작을수록, 유체의 밀도가 클수록 작으며, 유체의 표면 장력이 클수록 크다. 이러한 특성에 대한 식은 아래와 같다. (P.christopher, 1982)

$$h_i = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho_w g r_i}$$

여기서,

γ = water surface tension (N/m)

θ = contact angle of material

ρ_w = density of water (kg/m³)

g = gravitational acceleration (m/s²)

r_i = pore radius (m)

제 2 절 인공 경량 골재

1. 경량 골재 특성

최근 산업 부산물 등 건설 폐기물을 재활용한 골재가 생산되고 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 화력발전소에서 부산 되는 폐기물인 bottom ash(저회)는 많은 발생량에 비해 사용이 적어 이용 방법의 발전의 필요성이 존재한다. Bottom ash의 경우 폐기물의 재활용성이 높은 물질로서 콘크리트 배합, 블록 등 강도와 친환경성을 갖춘 재료라고 평가된다. (이창수, 최상현, 박중혁, 2009).

저회 입자의 물리적 특성은 아래 Table 1. 과 같다.

Table 6. bottom ash 입자의 물리적 성질 (박혜진, 2008)

밀도 (g/m ³)	실적률 (%)	흡수율 (%)	단위용적질량 (t/m ³)	열전도율 (kcal/mh℃)	입도 (mm)	색상
0.018	64.46	24	0.032	0.03	5~10	연회색

저회를 이용하여 경량 골재로 생산한 후 그 골재는 일반 자갈과 같은 골재와 비슷한 입도를 가지나 흡수율 등 기존 골재보다 큰 차이를 가지는 특성을 가진다. 일반적으로 저회 경량 골재는 100% 저회로 이루어진 저회 경량골재 (Bottom-Ash Light-weight Aggregate, BLA)와 저회 50%, 준설토 50%를 섞어 소성한 형태인 인공 경량 골재 (Artificial Light-weight Aggregate, ALA)로 생산된다. BLA의 성분은 아래 Table 2.와 같다.

Table 7. 저회 경량 골재 (BLA) 성분 분석 결과

시험항목	단위	결과치	시험방법
SiO ₂	%	65.9	KS L ISO 26845 : 2012 준용
Al ₂ O ₃	%	17.2	
Fe ₂ O ₃	%	1.7	
CaO	%	3.9	
MgO	%	1.3	
K ₂ O	%	0.844	
Na ₂ O	%	1.4	KS L ISO 26845 : 2012 준용, ICP)
TiO ₂	%	0.79	
P ₂ O ₅	%	0.09	
B ₂ O ₃	%	검출안됨	
Cr ₂ O ₃	%	0.01	
V ₂ O ₅	%	0.01	
Sb ₂ O ₃	%	검출안됨	

Table 8. 인공 경량 골재 (ALA) 성분 분석 결과

시험항목	단위	결과치	시험방법
SiO ₂	%	65.7	KS L 5120 : 2004 (준용)
Al ₂ O ₃	%	16.9	
Fe ₂ O ₃	%	6.64	
CaO	%	2.62	
MgO	%	1.44	
K ₂ O	%	2.14	
Na ₂ O	%	1.98	
TiO ₂	%	0.85	KS L 5120 : 2004 (준용, ICP)
P ₂ O ₅	%	0.94	
B ₂ O ₃	%	0.12	
Cr ₂ O ₃	%	0.04	
V ₂ O ₅	%	0.03	
Sb ₂ O ₃	%	검출 안됨	
ZrO ₂	%	0.03	
Li ₂ O	%	검출 안됨	
PbO	%	0.03	
MnO	%	0.09	

또한 저회로 골재를 생산했을 시 중금속 용출 시험 결과는 아래와 같다.

Table 9. 저회경량골재 (BLA) 유해성분검출 결과

시험항목	단위	결과치	시험방법
Pb	mg/L	불검출	폐기물공정시험기준 : 2015
Cu	mg/L	0.078	
As	mg/L	불검출	
Hg	mg/L	불검출	
Cd	mg/L	불검출	
Cr(VI)	mg/L	불검출	
CN-	mg/L	불검출	
유기인화합물	mg/L	불검출	
테트라클로로에틸렌 (PCE)	mg/L	불검출	
트리클로로에틸렌 (TCE)	mg/L	불검출	
기름성분	%	불검출	

위 성분 분석 및 중금속 검출 시험을 통해 저회(bottom-ash)를 이용한 경량 골재는 환경 및 인체 유해 물질을 보유하고 있지 않으며, 폐기물을 재활용 하는 골재의 친환경성과 경제성이 높다고 평가된다.

2. 경량 골재의 적용

경량 골재는 경도와 강도가 일반 골재에 비해 비슷한 값을 가지고 재활용된다는 점에서 골재의 친환경성과 경제성이 대두된다. (서치호, 1991). 이러한 특성으로 인해 바닥재 등의 건설 재료 등으로 쓰이거나 (Kim *et al.*, 2010) 여재, 식생 기반재 등 환경 소재로 쓰이고 있다. (박혜진, 2008) 환경 분야에서 경량 골재는 투수 블록으로 시편이 제작되어 해당 골재의 물리적 특성에 따른 수분 함양 및 빗물 흡수에 관한 연구가 진행되고 있다. (Kim, 2018) 또한 다공질인 구조를 통하여 비점오염 저감 효과에 관한 영향 또한 평가하고 있다. (Lim *et al.*, 2015)



Figure 5. bottom ash로 생산되는 경량 골재 (왼: BLA, 오: ALA)

제 3 장 실험 장치 및 방법

제 1 절. 골재 특성 분석

1. 골재 물성치 비교

침투 시설에서 쇄석 종류에 따른 침투 및 증발 거동을 알아보기 위해 먼저 실험에 사용할 쇄석을 선정하였다. 가장 일반적으로 쓰이는 일반 쇄석과 최근 쇄석의 대체 골재로 대두되고 있는 인공경량골재(ALA)와 저회경량골재(BLA)를 기존 사용되는 쇄석과 비교하였다.

KS F 2505 표준 시험법을 통해 공극률과 비중을 파악하였고, KS F 2503법을 통해 골재의 흡수율을 파악하였다.

골재 자체의 크기 분포를 파악하기 위해 KS F 2302법을 통해 입도 분포 곡선을 작도하였다. 해당 물성치 파악을 위하여 체진동기가 사용되었다.



Figure 6. (Vibratory Sieve Shaker, SS-10 Gilson)

측정된 골재의 물성치는 아래와 같다.

Table 10. Physical Characteristic of Aggregates

Method	Factor	A) Gravel	B) ALA	C) BLA
Particle size Distribution curve	Size	25mm	~25mm	~25mm
KS F 2505	Porosity	1.6	2.9	4.39
KS F 2503	Absorption	1.6	3.72	3.85
KS F 2504	Specific gravity	2.47 g/cm ³	1.32 g/cm ³	1.23 g/cm ³
—	Recycled	X	O	O

물성치에서 파악 할 수 있듯이 일반 쇄석 (Gravel)에 비해 ALA와 BLA의 공극률과 흡수율이 크게는 3배 가까이 큰 값을 가짐을 알 수 있었고 비중은 작은 것을 확인하였다. 즉 같은 부피에서 중량 값이 일반 쇄석 보다 ALA와 BLA이 큼을 확인했다.

Gravel, BLA 골재의 입도 분포 곡선을 통해 분류해본 결과 그 차이가 크지 않았으며 분류는 USCS법으로 두 종류 모두 GP임을 알 수 있었다.

Table 11. Particle size distribution of BLA and Gravel

Type	#200(%)	Gs	Cu	Cg	USCS
Gravel	0.21	2.47	2.34	1.42	GP
BLA	0.06	1.23	1.49	0.98	GP

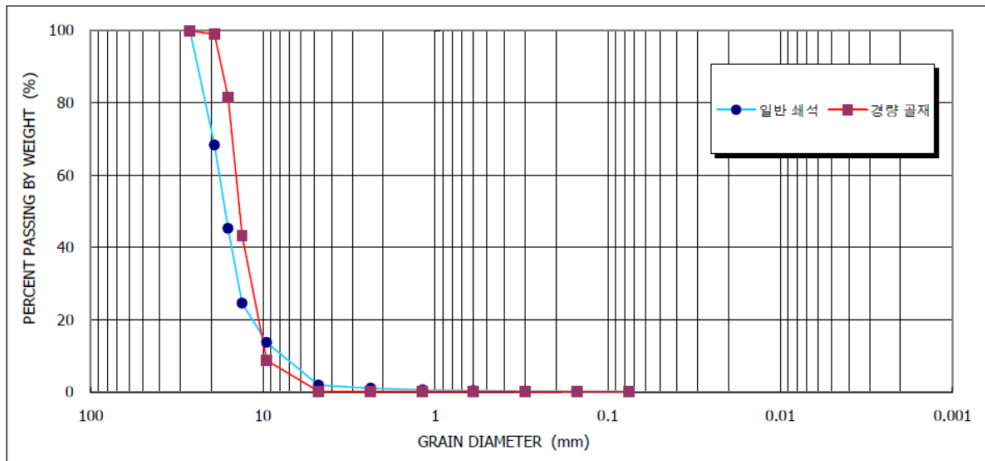


Figure 7. Particle Size Distribution of BLA(경량골재), Gravel (일반 쇄석)

2. X-ray CT를 통한 골재 공극 분석

골재의 물성치로 외부 공극에 대한 수치를 공극률과 흡수율로 파악할 수 있다면, X-ray CT를 통하여 골재의 내부 공극의 존재를 파악하고 그 부피 및 지름 등을 파악하여 보다 정확한 공극 분석이 가능하다. (Aboufoul *et al.*, 2019). 골재의 내부 공극 부피와 지름을 파악하고, 이를 통하여 모관 상승고, 투수 능력 등을 확인하고자 X-ray CT로 분석하였다. X-ray CT는 Polymer의 기공 size, 시멘트 등 solid 형태의 pore 크기 및 형상, crack 혹은 용접 부위 등을 파악할 때 쓰이는 방법이며, 물체를 파괴하지 하지 않고 3D imaging이 가능하게 하여 비교적 정확한 내부 구조 파악이 가능하다. 1973년 Hounsfield에 의해 의학 기술에 적용되었으며 현재는 구조, 신소재 등 다양한 공학 분야에 널리 쓰이고 있다.

본 방법은 물질에 방사선을 투과시켜 획득한 영상을 이용하고, 피검사체의 회전을 통하여 3D scanning 후 수학적으로 연산하여 특성을 수치

화한다. (김광염, 허성준, 권영철, 신희성, 임성빈, 2011)

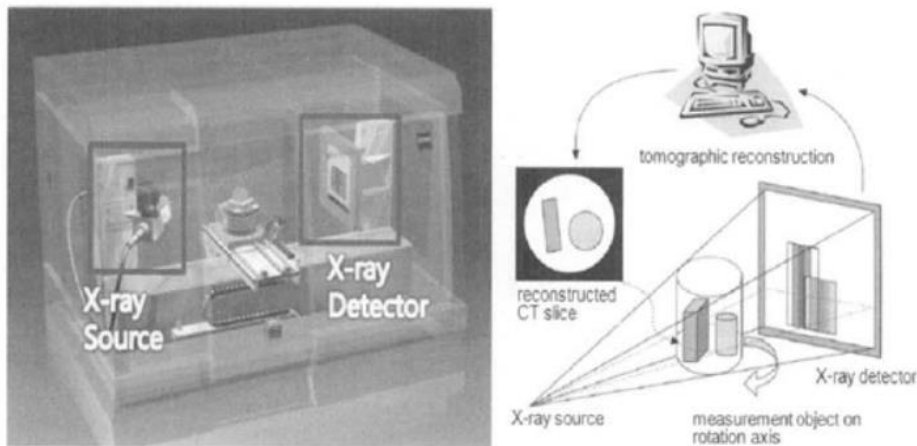


Figure 8. diagram of X-ray Computer Tomography (CT) (김광염, 허성준, 권영철, 신희성, 임성빈, 2011)

실험에 사용할 골재의 한국과학기술원 중앙분석센터에 위치한 X-ray Microscope(ZeISS Xradia 520 Verssa)를 이용하여 특성을 측정하였다.

Gravel의 경우 Width: 271px, Height: 171 px, Depth: 323 px 의 배율로 환산하여 14,968,143 voxel로 측정하였고 이때의 골재 총 부피는 156,903,051,330.48 μm^3 이었다. BLA의 경우 Width: 489 px, Height: 522 px, Depth: 537 px 으로 환산하여 137,073,546 voxel로 측정되었고 이때의 골재 총 부피는 179,588,904,066.18 μm^3 으로 측정되었다.



Figure 9. X-ray Microscope (ZeISS Xradia 520 Verssa)

X-ray CT로 scanning한 골재의 3D 이미지는 아래와 같다. 여기서 BLA의 경우 파란색으로 표시되는 부분이 공극과 표면에서 패인 부분이며, 이미지에서와 같이 고르게 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

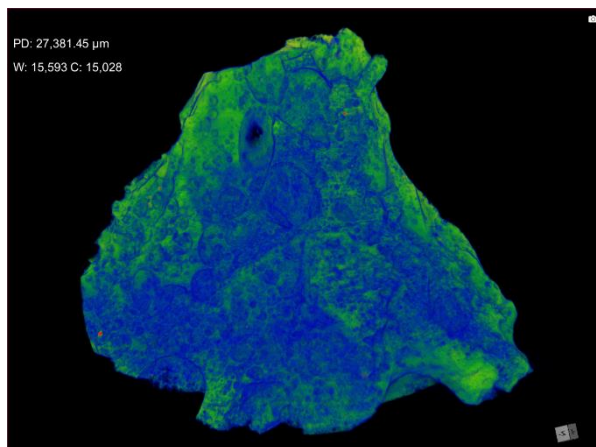


Figure 10. 3D image of BLA

Gravel의 3D 이미지는 아래와 같다. 여기서 Gravel의 경우 BLA에 비해 같은 색의 분포도가 고르지 않은 것을 볼 수 있는데 이는 공극과 표면의 패임이 고르지 않다고 볼 수 있다.

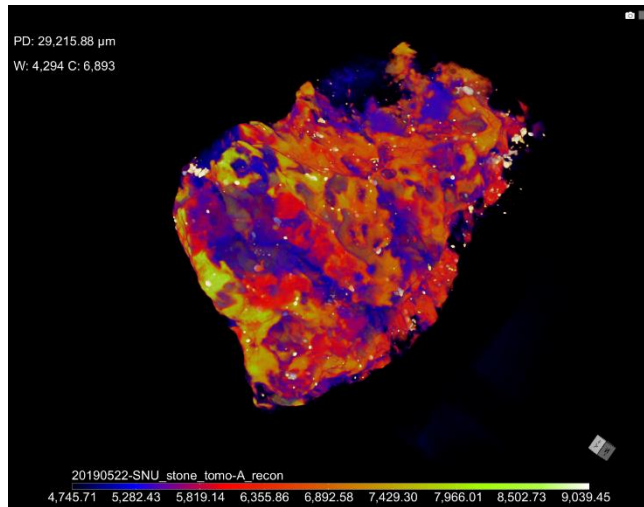


Figure 11. 3D image of Gravel

두 종류의 골재를 실제 크기와 모양으로 측정했을 때에는 표면과 내부 공극을 명확히 구분 지어 판단하기 어렵다. 때문에 측정된 부피 등 정량적인 수치로 직육면체로 변환하여 공극의 분포를 정량적으로 파악하였다.

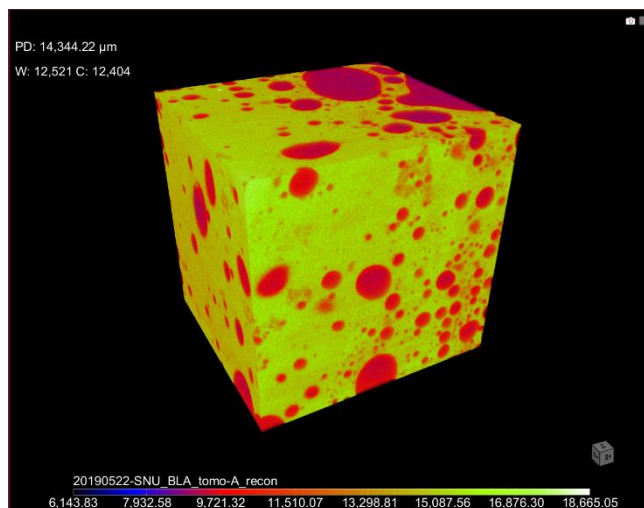


Figure 12. Converted 3D image of BLA to rectangular parallelepiped

BLA의 골재를 직육면체 모형으로 변환 시킨 후 총 부피를 파악한 결과 골재 자체의 부피는 $179,588,904,066.18 \mu\text{m}^3$ 이고, 내부 공극의 총 부피는 $61,634,911,875.512 \mu\text{m}^3$ 로 전체 골재 총 부피의 약 34.32%로 측정되었다. 이는 골재의 내부 공극 정도를 파악 할 수 있는 척도인 표준 시험법으로 측정한 흡수율 보다 약 10배 차이를 보이는 값이다. 이는 물의 무게로 비교하여 확인하는 흡수율 시험법보다 X-ray CT로 직접 scanning하여 모든 미세 공극까지 파악 할 수 있기 때문에 정확한 값을 얻었다고 사료된다. 또한 해당 3D image의 경우 빨간색으로 표시된 것이 내부 공극이었는데 다양한 크기로 분포됨을 분명히 파악할 수 있었다.

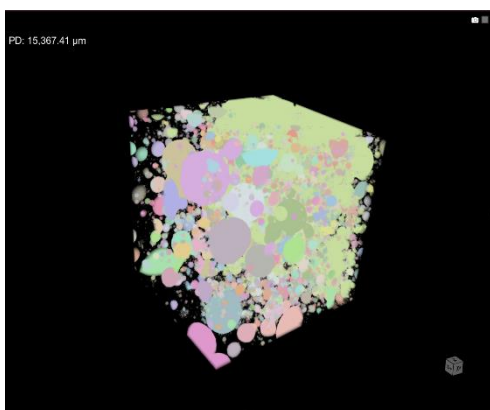


Figure 13. Inner pore distribution of BLA

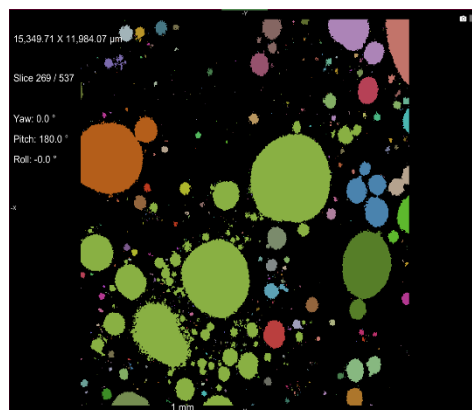


Figure 14. Single fragment of BLA

Gravel의 경우 직육면체 모형으로 변환 시킨 후 파악한 총 부피는 $156,903,051,330.48 \mu\text{m}^3$ 이며, 공극은 존재하지 않았다. 아래의 그림에서 보이는 바와 같이 Figure 12의 BLA에 비해 내부 구조를 뚜렷이 파악할 수 없었다. 이는 X-ray CT 상으로 공극 측정이 불가하다는 뜻으로 골재에 내부 공극이 존재하지 않는다고 판단할 수 있다.

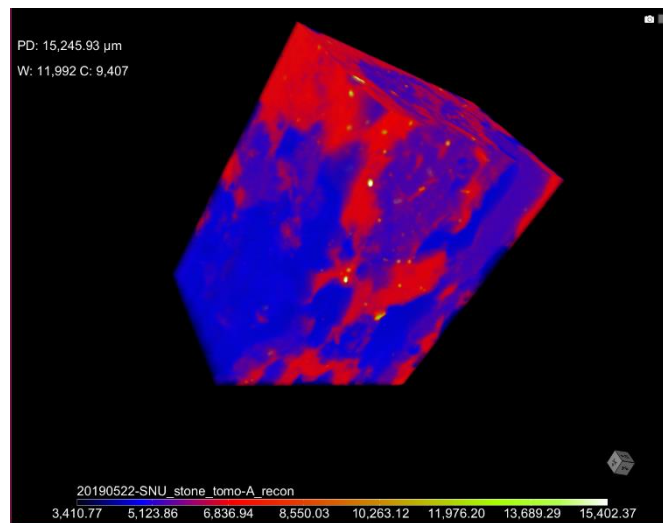


Figure 15. Converted 3D image of Gravel to rectangular parallelepiped

제 2 절. 실험 장치

1. 침투 실험

본 연구에서 사용한 침투 시설의 lab-scale 모형은 다음과 같다. 쇠석이 들어갈 침투 시설의 크기는 가로, 세로, 높이는 모두 10 cm 이며 침투 시설에서 물이 유입을 위한 유공관을 설치하였다. 토조의 크기는 가로 30cm, 세로 10cm, 높이 50cm로 하였고 높이 40cm까지 주문진 표준사를 채워 넣었다. 또한 토조의 밑부분에 배수를 가능케 하여 침투 실험 진행 후 유입된 물의 양이 표면 유출을 일으킬 때 배수하였다.

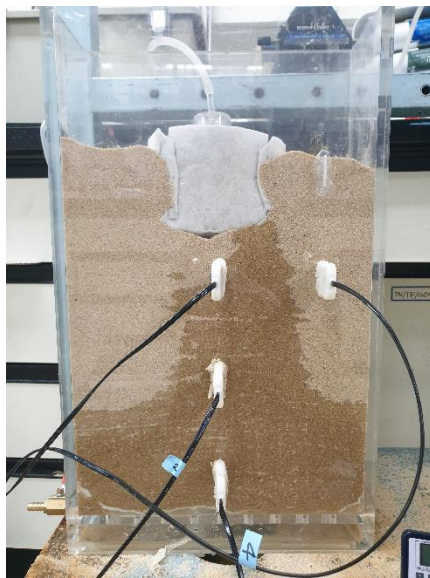


Figure 16. Photograph of Infiltration Soil Column

침투 실험에 사용한 토양은 주문진 표준사로 일반적인 토조 실험에 주로 사용되는 토양이다. 해당 토양에 대한 물성치 파악을 위하여 비중계 분석을 통해 입도 분포 곡선을 실시했다.

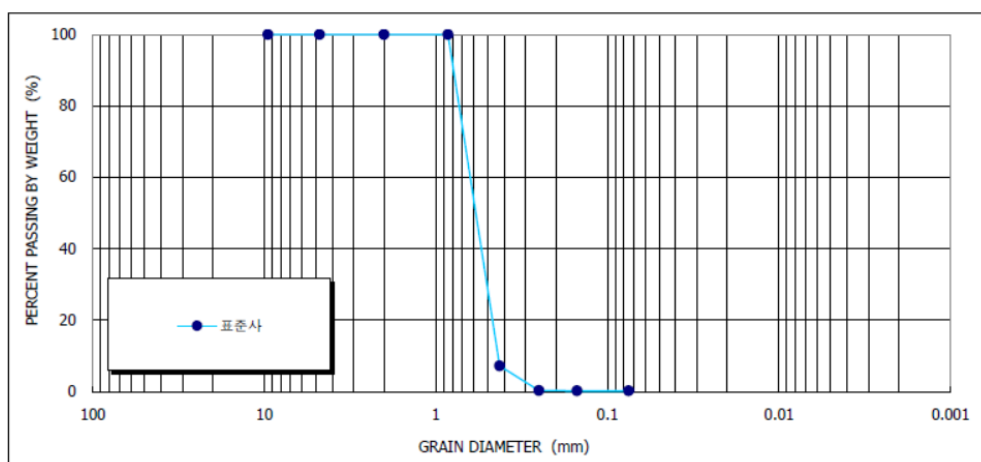


Figure 17. Grain size distribution of Joomunjin Sand

입도 곡성을 통하여 얻은 특성 값은 다음과 같다. 토양의 특성과약을 통해 해당 토양은 비교적 투수성이 큰 흙임을 알 수 있었다.

Table 12. Physical property of Joomunjin Sand

W _n (%)	#200 (%)	G _s	C _u	C _g	USCS
0.1	0.3	2.63	1.47	0.92	SP

침투 실험을 위한 시스템은 다음과 같다. 침투 시설의 유공관에 14mm PTFE horse를 연결하고 Peristaltic pump (EW-77919, masterflex)로 유입량을 조절하였다. 토조에 주문진 표준사를 넣을 때 1m 이상의 높이에서 강사법으로 다짐하였다. 침투 시설에서부터 10cm, 20cm,

30cm 깊이로 TDR sensor (VWC T6, TSE)를 꽂아 10초의 interval로 토양 수분을 측정하였고 이는 체적함수비로 Data logger(DT82, Data Taker)에 기록되었다. 토조 안에 12L의 주문진 표준사를 일정 높이로 채우고 원수로 수돗물을 주입하여 실행하였다.

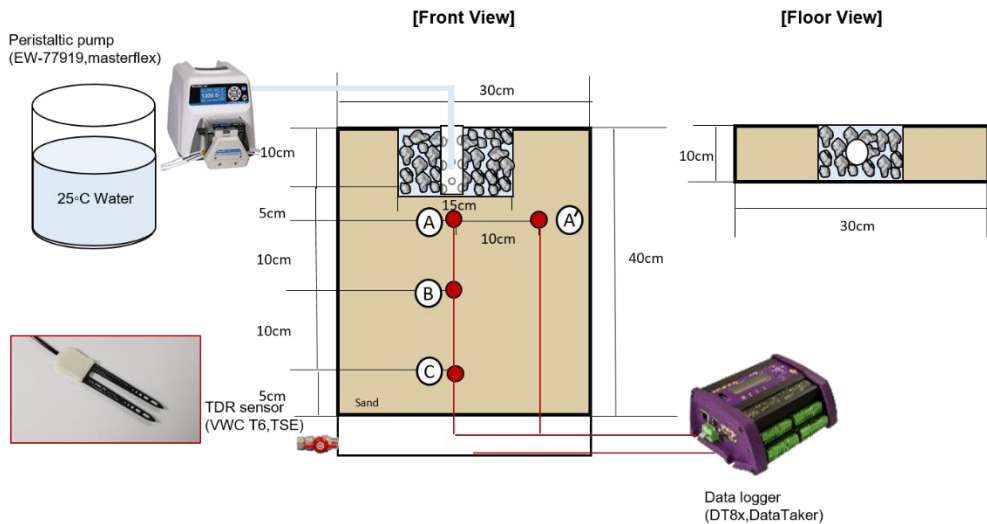


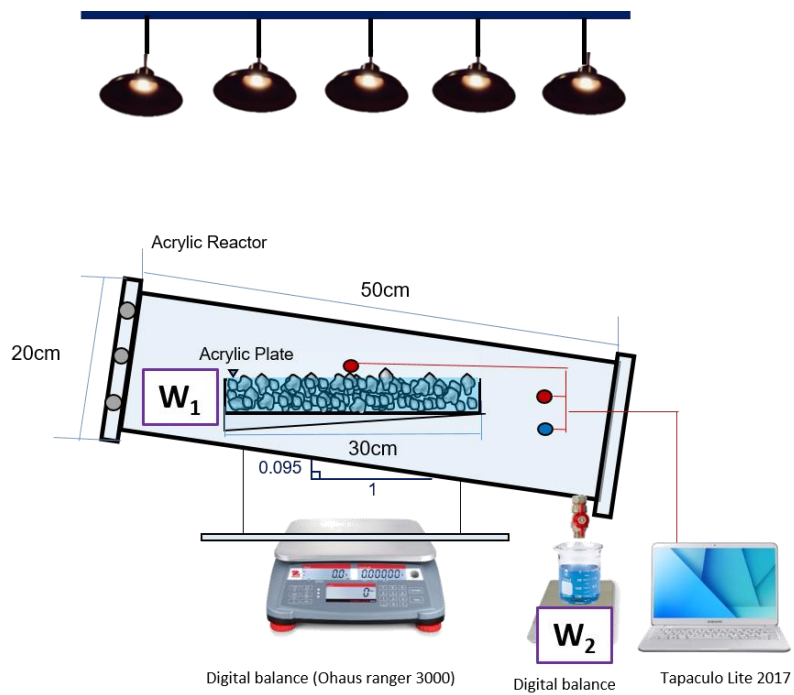
Figure 18. Experiment diagram of infiltration system

2. 증발 실험

골재 특성에 따른 증발 거동 특성을 알아보기 위해 실내 증발 실험을 실행하였다. 원통형 아크릴 컬럼을 제작하여 그 기울기를 가로: 세로 비율 1:0.095로 기울여 설치하였고, 원통 지름을 20cm, 길이를 50cm로 제작하였다. 원통 내부에 골재를 넣을 아크릴 컨테이너를 가로 30cm, 세로 10cm, 높이 30cm로 제작하였다. 리액터 위에 적외선 램프 250W 5개를 설치하여 증발을 위한 태양 복사 모의를 하였고 리액터 전체를 Digital balance (Ohaus ranger 3000) 위에 얹고 실험 진행하며 지속적으로 무게를 기록하였다. 또한 기울여진 원통형 아크릴 컬럼 가장 밑 부분에 유출구를 설치하여 증발되는 물이 유출하게 하였다. 유출된 물은 비이커에 모여 미세 저울로 측정되었다. 또한 골재 표면과 리액터 안 빈 공간에 Thermocouple을 설치하여 Tapaculo lite 2017 프로그램을 이용하여 온도를 기록하였다. 상대 습도 센서를 리액터 내부에 설치하여 기록하였다.



Figure 19. Photograph of evaporation Experiment set up



[Front view]

Figure 20. Diagram of evaporation experiment set up

제 3 절. 실험 방법

1. 골재 특성에 따른 침투 실험

빗물 침투 특성에 영향을 주는 인자는 다양하다. 주변 기후, 토양, 시설, 지하수위 등이 있다. 본 실험은 현장 설치가 아닌 lab-scale이므로 지하 수위에 대한 고려는 하지 않았다. 따라서 본 실험에서는 주변 기후 특성인 강우와 관련된 유입량, 토양 특성인 초기 함수비, 그리고 시설의 특성인 골재에 따른 침투 거동을 살펴보고자 하였다.

먼저 시설의 특성인 골재에 따른 침투 실험을 진행하였다. 침투 시설에서 가장 큰 비중을 차지하며, 주로 침투 시설 공간 내 채움재 역할과 커진 공극을 통해 침투성을 높이는 역할을 하는 골재를 일반 쇄석, BLA로 선택하여 시설 내에 채워 넣었다. 유입량은 600ml/min으로 설정하여 누적 침투량을 측정하고 깊이별 침투 속도를 측정하였다.

두번째로 유입량에 따른 침투 실험을 진행하였다. 주변 기후 특성인 강우가 유입관을 따라 시설 내에 유입되는데 이때의 유입량은 300ml/min, 600ml/min, 900ml/min으로 설정하였다. 이 설정값은우리 나라 강우강도와 재현빈도를 고려하여 실험조 크기를 토대로설정한 값이다.

마지막으로 초기 함수비에 따른 실험을 진행하였다. 침투 시설에서 가장 큰 영향을 미치는 조건 중 하나인 토양의 특성의 대표적인 인자인 초기 함수비를 변화시켜 해당 함수비에 따라 침투 능력의 변화가 어떤 영향을 미치는 지 알아보았다. 이때의 초기 함수비

는 완전 건조인 0%, 10%, 20% 로 설정하였다.

해당 실험에서 측정되는 체적 함수비와 유입량 그리고 시설의 사이즈 등의 수치 값으로 침투량 및 침투율을 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$Q_{infiltration} = Q_{in} - (A_1 \times \Delta h)$$

Where,

$Q_{infiltration}$: The infiltration volume (L)

Q_{in} : Inflow rate (ml/min)

A_1 : Bottom area of infiltration facility (cm^2)

Δh : The change of water depth in infiltration facility.

침투 시설 내에 유입 되는 물이 토조 표면으로 오버플로우 되면 유입을 멈춰 경과된 시간을 침투 시간으로 산정하였다.

2. 골재 특성에 따른 증발 실험

골재 특성에 따른 증발 거동의 변화를 알아보기 위해 마련된 증발 실험 리액터에서 BLA와 Gravel을 번갈아 넣어 아크릴 컨테이너의 무게 변화와 유출 밸브를 통해 모인 물의 무게를 측정하여 증발량을 비교하였다. 이때 복사열을 위한 조명은 6시간~8시간동안 켜고 매 데이터에 대한 기록은 1시간 간격으로 측정하였다. 이 때 측정된 인자는 무게, 표면 및 대기 온도, 상대 습도이다. 먼저 주입한 물의 양과 변화한 물의 양을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W_{Total}(g) = W_1 + W_2$$

Where,

W_1 = Weight of Acrylic Plate with water

W_2 = Weight of output water

W_1 과 W_2 의 관계를 나타내면 아래와 같다.

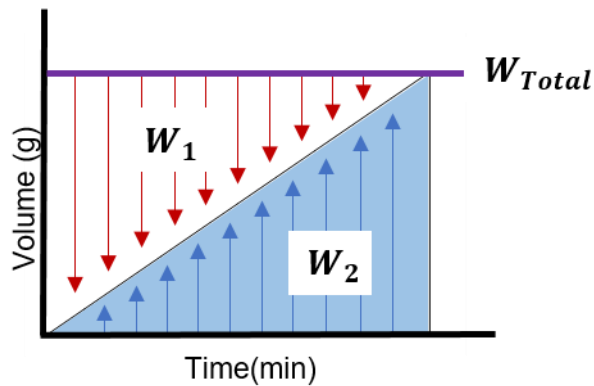


Figure 21. Relationship between measured weight

증발 실험에서 측정한 골재의 무게, 물의 무게 변화 등으로 계산하여
공극의 특성별로 나눈 물의 무게는 다음과 같다.

$$W_{Total}(g) = W_A + W_B + W_C$$

Where,

W_A = Water of Inner void

W_B = Water of Outer void

W_C = excessive Water in Acrylic Plate (constant)

이 무게는 골재의 함수에 대한 조건인 Saturated, Semi-saturated,
Unsaturated 으로 설정하였을 때 그 상태를 설명할 수 있다.

각 상태 별 존재하는 물의 무게를 표현하면 아래와 같다.

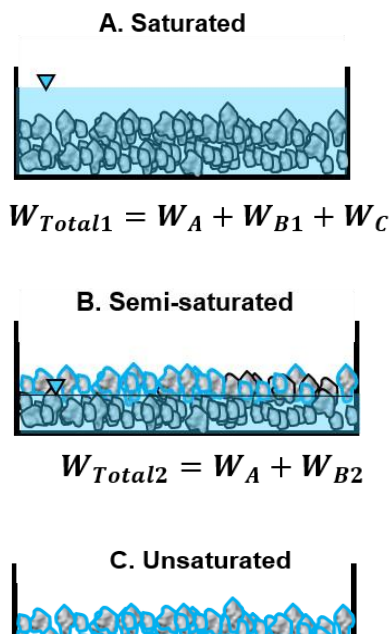


Figure 22. Relationship between
weight of each void in water
condition

측정된 증발량과 경과 시간으로 증발 속도를 구하였으며, 이 증발 속도로 물이 증발될 때의 잠열 에너지(Latent heat flux)를 계산하였다. 잠열 에너지란 물이 증발할 때 일어나는 상태변화, 즉 액체에서 기체로 변화할 때 필요한 주변이 에너지를 말하며 증발 에너지가 클수록 주변의 에너지를 많이 빼앗는다.

잠열 에너지를 구하기 위한 식은 아래와 같다.

$$H_l = \rho_l E$$

Where,

H_l : Latent Heat Flux (W/m^2)

ρ : Density of Water (Kg/m^3)

L_v : Latent heat of Vaporization (MJ/Kg)

E : Evaporation Rate (mm/day)

제 4 장 실험 결과 및 고찰

제 1 절. 골재 특성에 따른 침투 능력

1. 골재에 따른 침투 능력 측정

골재에 따른 깊이별 침투 속도에 대한 결과는 아래와 같다.

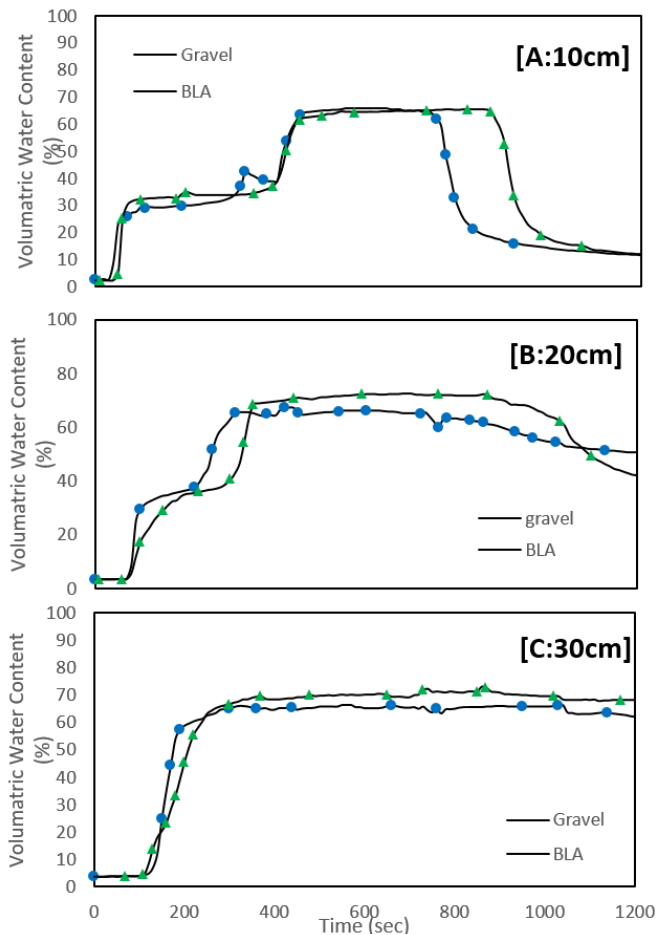


Figure 23. Comparison of Infiltration capacity according to filling Material Type

침투 시설에 BLA, Gravel 을 번갈아 넣고 600ml/min 의 유입량으로 설정한 후 실험을 진행하여 각 센서에 측정된 체적함수비를 확인한 결과, 침투 시설과 가장 가까운 10cm 에서는 표면 유출까지의 시간 차이, 즉 토조 전체에 물이 유입되고 포화된 상태까지의 시간 차이가 존재하였다. 이를 토대로 표면 유출이 일어나기까지의 총 침투량을 유입량을 통해 계산한 결과 자갈과 BLA 의 총 침투량이 약 1000ml 정도의 차이를 보였으나, 이는 침투 시설 내의 쇄석의 부피로 인한 결과로 사료된다. 20cm, 30cm 의 깊이에서는 침투 속도의 차이가 비교적 없었다. 또한 토조에서 침투가 시작될 때 표준사의 큰 투수성으로 인해 빠르게 아래로 수직 거동하여 아래부터 포화되어 토조가 차오르는 것을 알 수 있었다. 이는 침투 시설의 쇄석이 침투속도에 미치는 영향이 낮은 것을 알 수 있다.

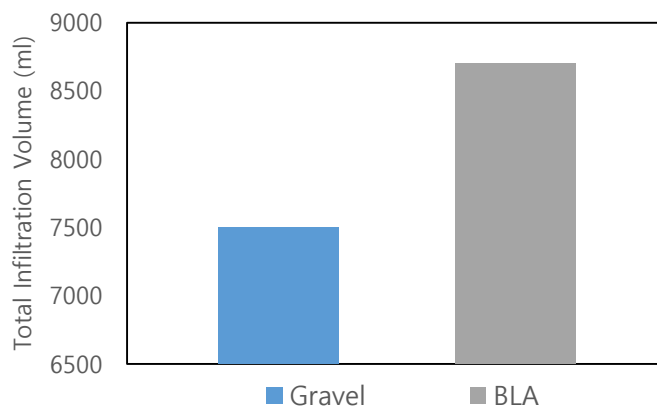


Figure 24. Total Infiltration Volume at start of overflow

2. 유입속도에 따른 침투 능력 측정

앞에서 골재에 따른 침투 실험에서 침투량이 비교적 큰 값을 보인 BLA 로 채석을 설정하여 유입속도를 300ml/min, 600ml/min, 900ml/min 으로 변화시켜 침투 속도와 포화 속도를 측정한 결과 유입속도가 빠를수록 침투 속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다. 그러나 첫번째 실험과 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 유입 속도에 따른 차이가 적어짐을 확인했다. 깊이 10cm 에서 사실상 포화라고 볼 수 있는 체적함수비 60% 이상에 도달하는 시간은 유입속도가 300ml/min 일 일 때에 비해 900 ml/min 일 때 최대 890sec 차이를 보였다. 그러나 깊이 30cm 에서는 그 차이가 약 68 sec 로 줄어들었는데 이는 이전 결과와 마찬가지로 강우 인자인 유입속도의 변화가 전체 침투 능력에 미치는 영향이 미비하다고 볼 수 있다.

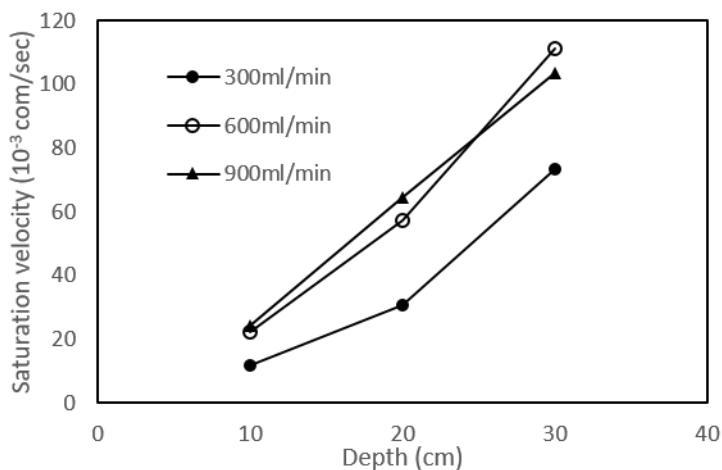


Figure 25. Saturation Velocity according to inflow rate

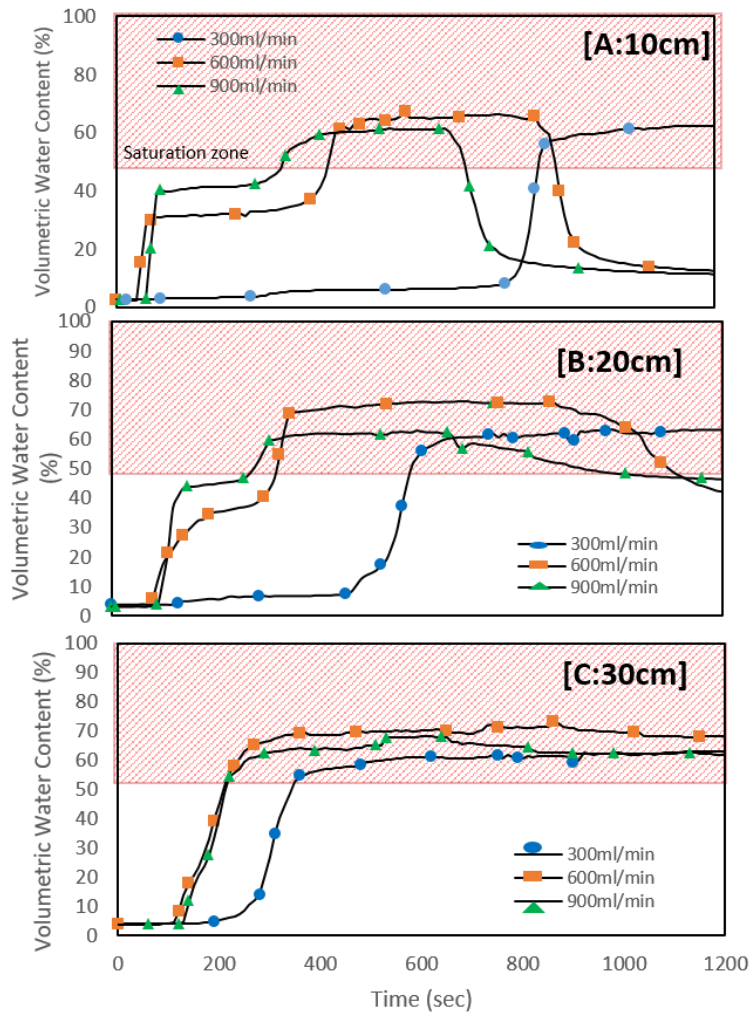


Figure 26. Volumetric water content according to inflow rate

3. 초기함수비에 따른 침투 능력 측정

침투 시설에 영향을 끼치는 인자 중 하나인 토양 인자인 초기 함수비를 변화시켜 침투 속도와 포화 속도를 측정하였다. 초기 함수비의 경우 완전 건조 상태인 0%, 10%, 20%로 설정하였고 일반적으로 주문진 표준사로 실행하는 침투 실험에서 사용하는 초기 함수비 조건이다. BLA 골재를 사용하여 유입 속도를 600ml/min 로 설정하여 진행하였을 때 실험 결과는 초기 함수비가 클수록 침투 속도는 느려짐을 확인하였다. 이는 공극에 이미 차있는 물의 부피 때문이라고 사료되며 공극 내의 물이 침투성을 저하시킴을 확인 할 수 있다.

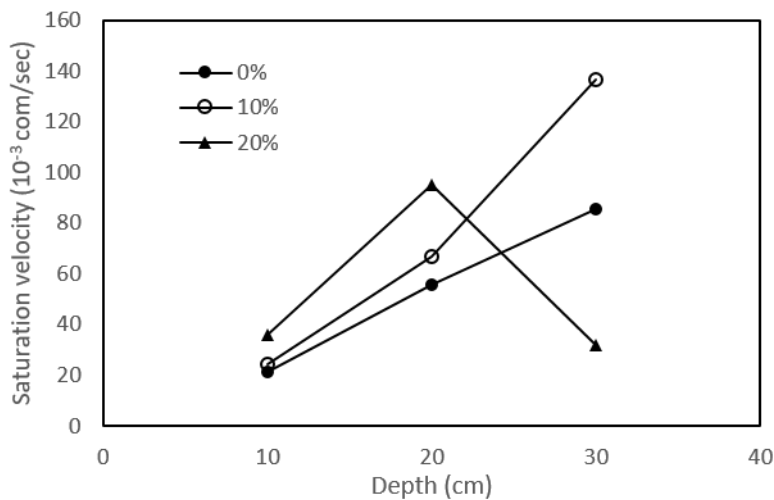


Figure 27. Saturation Velocity according to initial water content

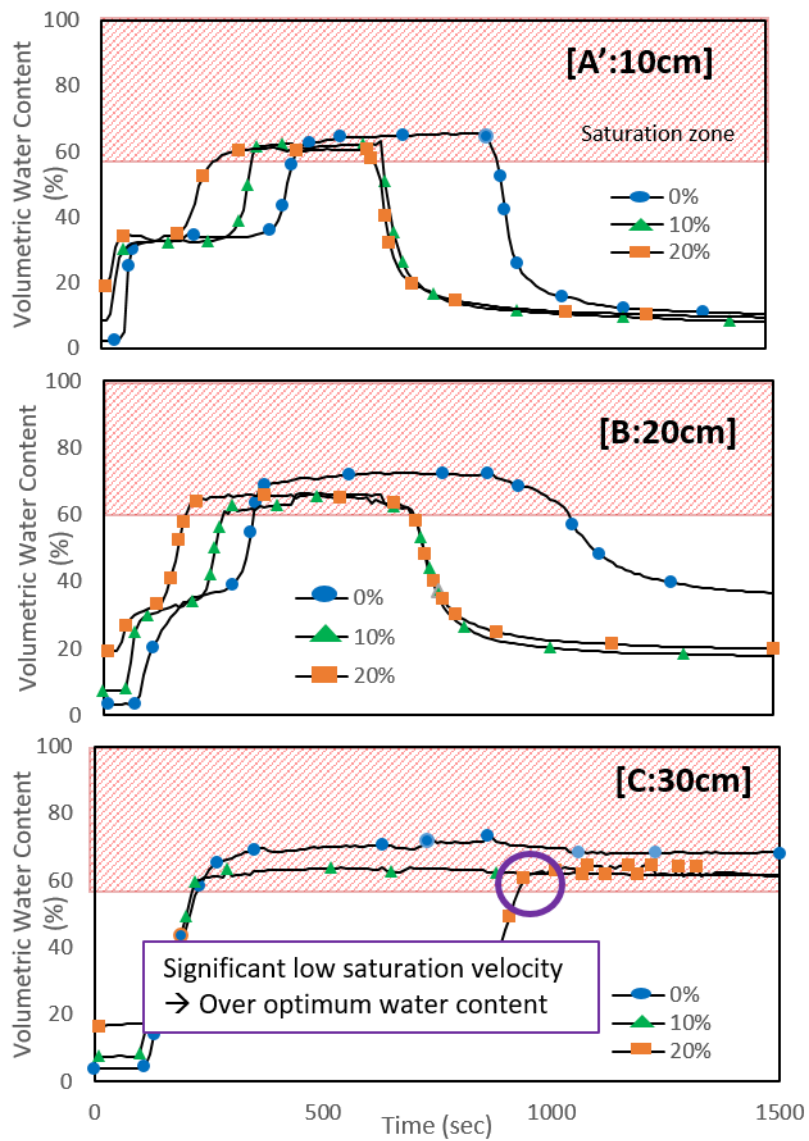


Figure 28. Volumetric water content according to initial water content

이전 실험과 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 침투 시설에 따른 침투 속도 차이가 점점 감소 양상을 보였는데 깊이 30cm 에서 초기 함수비가 20%일 때 포화 속도가 급격히 느려짐을 확인했다. 이는 주문진 표준사 자체의 최적함수비 이상의 초기 함수비로 인한 결과라고 사료된다.

함수비에 따라 토양의 상태를 수화, 윤회, 팽창, 포화 단계로 나눌 수 있는데 첫번째 단계인 수화 단계는 함수량이 부족하여 토양 입자 서로의 접촉이 일어나지 않는 단계이다. 두번째 단계인 윤회 단계는 물의 일부가 자유수로 토양 입자 사이를 움직이는 윤회 역할을 하는 단계이다. 세번째 단계는 팽창 단계로 물이 토양이 다져질 때 잔류 공기를 압축하여 토양 또한 압축 후 팽창하게 되는 단계이다. 마지막 단계인 포화 단계는 팽창으로 인한 증가된 물이 실제적으로 포화를 이루는 단계이다. 이러한 이론적 뒷받침으로 인해 최적함수비보다 적은 건조에서는 침투율이 증가하지만 많은 습윤에서는 침투율이 감소한다는 실험 결과를 뒷받침한다.

제 2 절. 골재 특성에 따른 증발 능력

1. 포화 상태에서의 증발

증발 실험을 위한 리액터에 골재 BLA 와 Gravel 을 번갈아 채워 넣고 조명을 6 시간동안 켜 실험을 진행한 결과 골재 모두 물로 포화된 조건에서는 증발 속도의 차이가 없다고 보여졌다. 또한 총 증발량도 약 각각 Gravel 의 경우 63.8g, BLA 의 경우 72.7g 으로 그 차이가 비교적 작았는데 이는 골재의 외부 공극, 내부 공극의 물이 증발하지 않고 골재 높이 이상으로 채워진 자유수면에서 증발이 일어났기 때문이라고 사료된다. 즉 강우 후 침투 시설에서 토양으로의 침투 혹은 배수가 이루어지지 않아 시설 내에 물이 가득 차있는 상태의 경우에는 시질의 인자인 쇄석에 따른 영향이 미비한 것으로 알 수 있다.

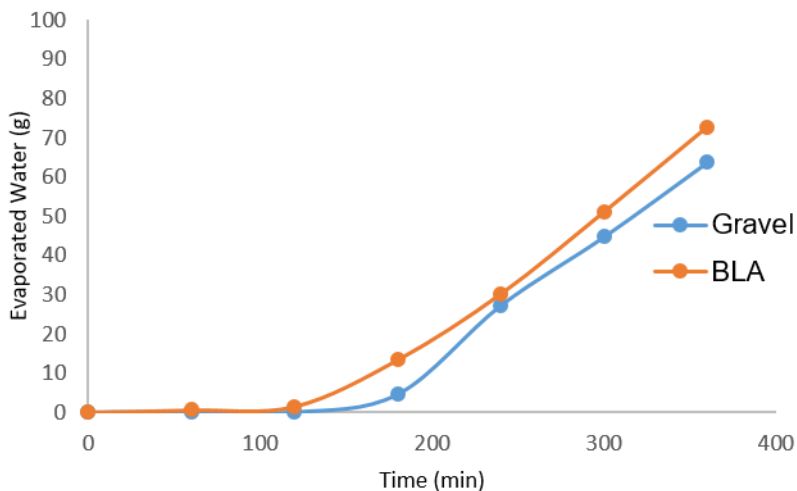


Figure 29. Cumulative evaporation according to filling material type

포화 상태에서 증발된 물의 양과 계산된 증발 속도를 토대로 구한 증발 잠열 flux 는 아래와 같다.

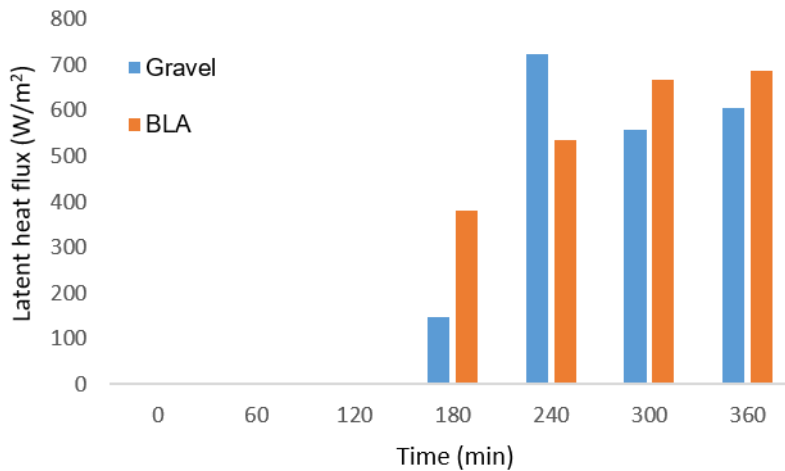


Figure 30. Latent heat flux of saturated condition

240 min 의 경우를 제외하고 주로 BLA 를 넣었을 때의 잠열 flux 가 비교적 큰 값을 보였다. 최대 차이를 보인 300min 일 때의 BLA 의 경우 약 665.63 W/m^2 , Gravel 의 경우 557.35 W/m^2 로 그 차이가 약 108.28 W/m^2 이었다.

표면 온도와 대기 온도의 경우 Gravel 을 넣었을 때와 BLA 를 넣었을 때 그 차이가 비교적 크지 않음을 알 수 있었다. 표면 온도의 경우 최대 온도가 약 70°C 였고 대기 온도의 경우 약 60°C 로 측정되었다.

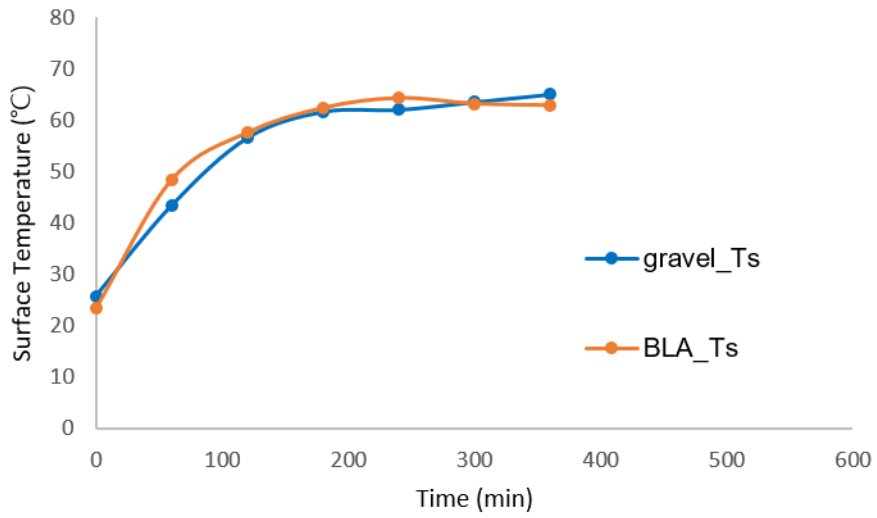


Figure 31. Comparison of surface temperature according to filling material type

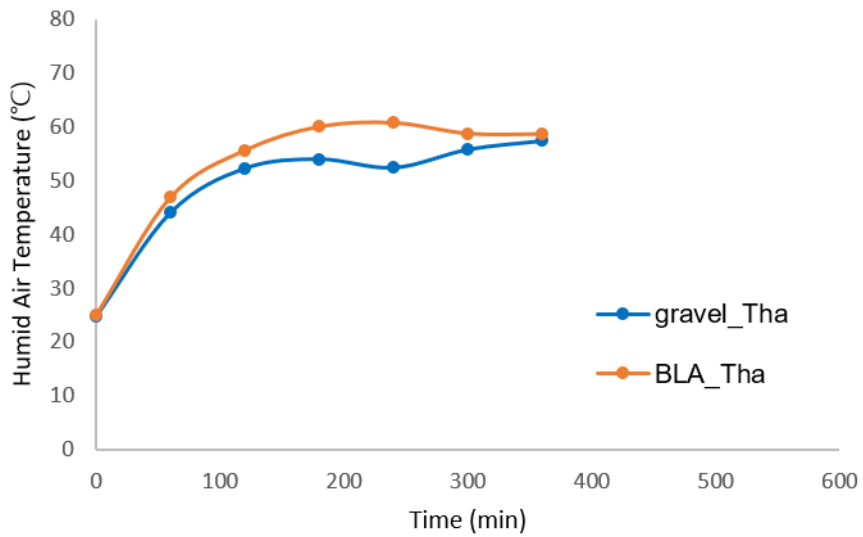


Figure 32. Comparison of humid air temperature according to filling material type

2. 중간 포화 상태에서의 증발

중력수가 일부 빠지고 일부 포화 상태의 골재에서 증발 실험을 실행한 결과, 골재 종류에 따른 증발량의 변화 차이는 크지 않았다. 총 증발량은 BLA 를 적용시켰을 때와 Gravel 을 적용시켰을 때 약 85g 으로 비슷한 결과를 보였다.

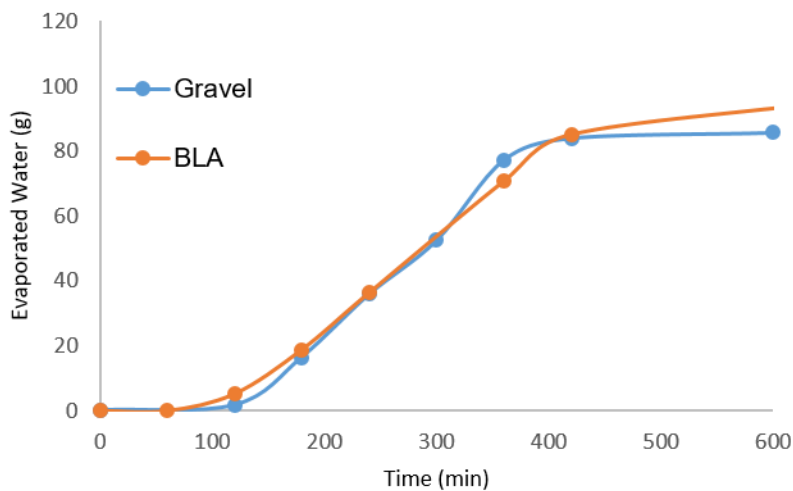


Figure 33. Comparison of cumulative evaporation according to filling material

중간 포화 상태에서 증발된 물의 양과 계산된 증발 속도를 토대로 구한 증발 잠열 flux 는 아래와 같다.

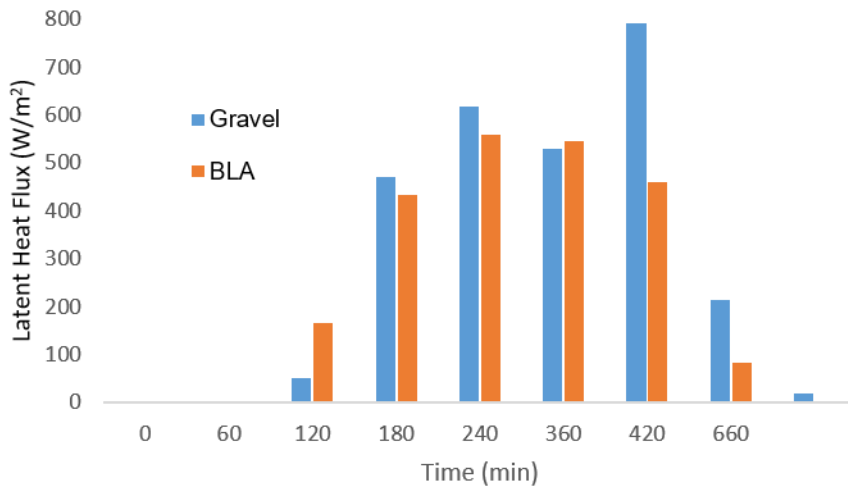


Figure 34. Comparison of latent heat flux according to filling material

120min 일 때의 값을 제외하고 BLA 의 적용했을 때와 Gravel 을 적용하였을 때의 차이가 크지 않았으며 최대 차이를 보인 420min 일 때의 BLA 의 경우 약 789.84 W/m^2 , Gravel 의 경우 458.62 W/m^2 로 그 차이가 약 331.22 W/m^2 이었다. 그러나 해당 값은 그래프의 경향과 다소 튀는 값을 보여 재확인이 필요하다고 사료된다.

표면 온도와 대기 온도의 경우 Gravel 을 넣었을 때와 BLA 를 넣었을 때 그 차이가 비교적 크지 않음을 알 수 있었다. 표면 온도의 경우 최대 온도가 약 70°C 였고 대기 온도의 경우 약 60°C 로 측정되었다.

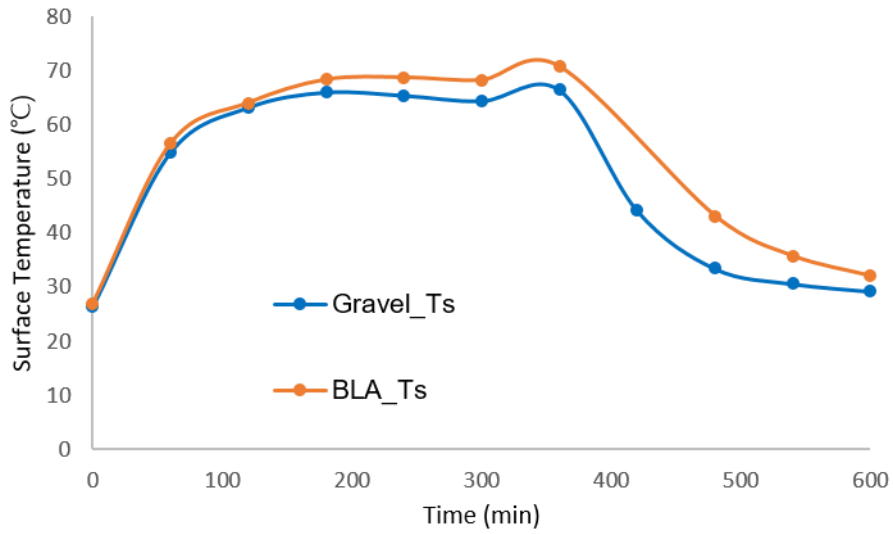


Figure 35. Comparison of surface temperature according to filling material

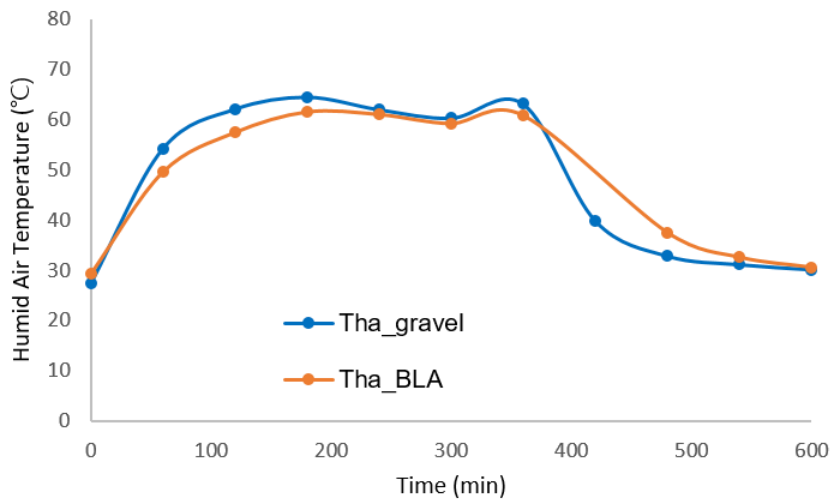


Figure 36. Comparison of humid air temperature according to filling material

3. 불포화 상태에서의 증발

중력수가 전부 빠지고 불포화 상태의 골재에서 증발 실험을 실행한 결과, 골재 종류에 따른 증발량의 변화 차이는 약 14.3g 이었으며, 증발 속도 또한 차이를 보였다. 아크릴 컨테이너에 골재 없이 물만 넣었을 때보다 느린 증발 속도를 보였으나 BLA 의 경우 Gravel 보다 빠른 증발 속도임을 알 수 있었다. 이는 불포화 상태에서는 골재 공극에 남아 있는 물이 증발하게 되는데, 이때 자유 수면보다는 증발이 자유롭지 않으나 내부 공극으로 인한 증발포텐셜이 높아지기 때문이라고 사료된다. 총 증발량은 BLA 를 적용시켰을 때에는 약 30.8g, Gravel 을 적용시켰을 때 약 14.9g 으로 약 두 배 차이를 보였다.

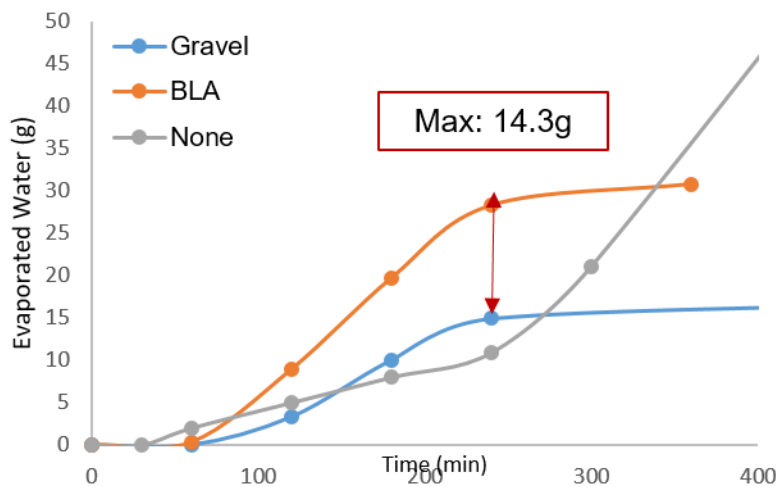


Figure 37. Comparison of cumulative evaporation according to filling material

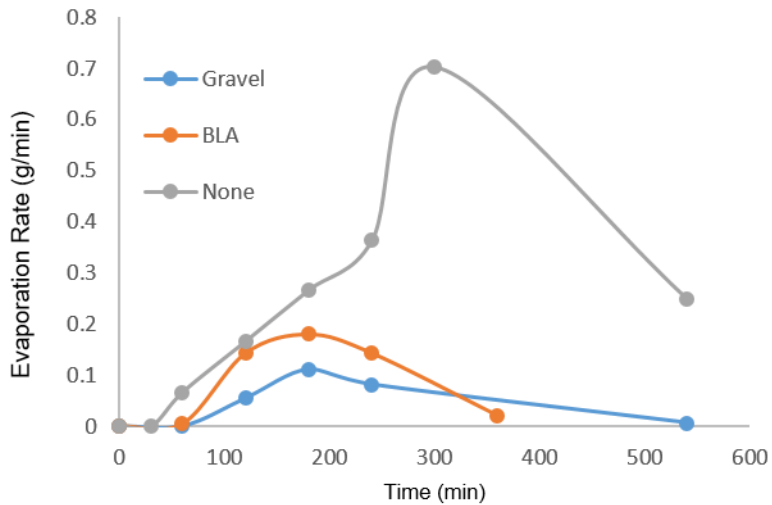


Figure 38. Comparison of cumulative evaporation rate according to filling material

불포화 상태에서 증발된 물의 양과 계산된 증발 속도를 토대로 구한 증발 잠열 flux 는 아래와 같다.

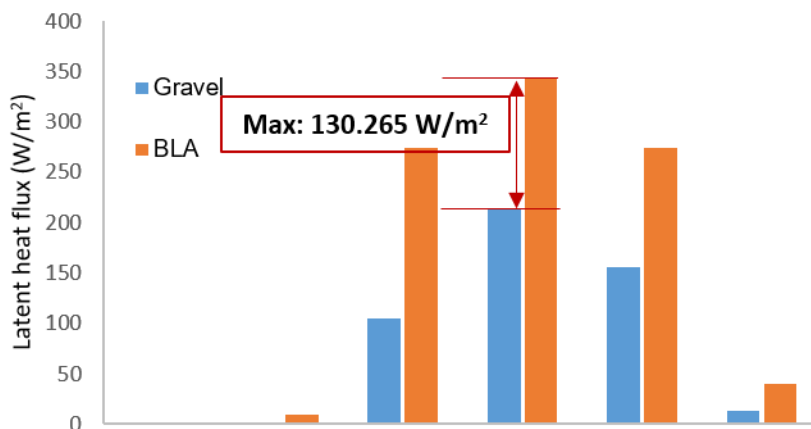


Figure 39. Comparison of latent heat flux according to filling material

BLA 의 적용했을 때 잠열 flux 값은 일정하게 Gravel 을 적용하였을 때의 값보다 큰 값을 보였다. 최대 차이를 보인 180min 일 때의 BLA 의 경우 약 343.965 W/m^2 , Gravel 의 경우 213.385 W/m^2 로 그 차이가 약 130.265 W/m^2 이었다. 즉 중력수가 모두 배제되고 공극수만 남아있는 상태인 경우 BLA 골재의 영향이 증발량 및 속도와 잠열 flux 에 큰 영향을 미침을 확인했다.

대기 온도의 경우 Gravel 을 넣었을 때와 BLA 를 넣었을 때 그 차이가 가장 높은 온도 였을 때 Gravel 의 경우 78°C , BLA 의 경우 65.2°C 로 최대 차이가 12.8°C 이었다.

상대 습도의 경우 BLA 를 적용시켰을 때 Gravel 을 적용시켰을 때보다 더 빨리 대기 포화가 이루어짐을 확인했다. BLA 를 적용시켰을 때의 대기 포화 도달 시간은 340 min, Gravel 를 적용시켰을 때의 대기 포화 도달 시간은 526 min 으로 약 180min 차이를 보였다

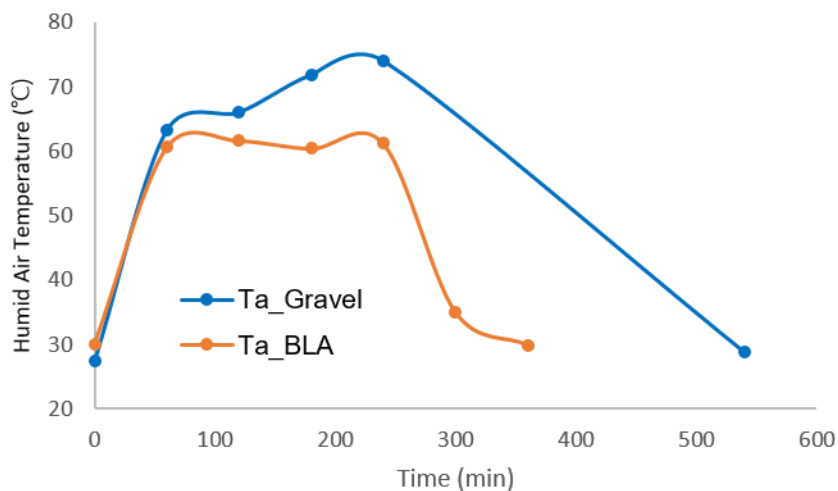


Figure 40. Comparison of humid air temperature according to filling material

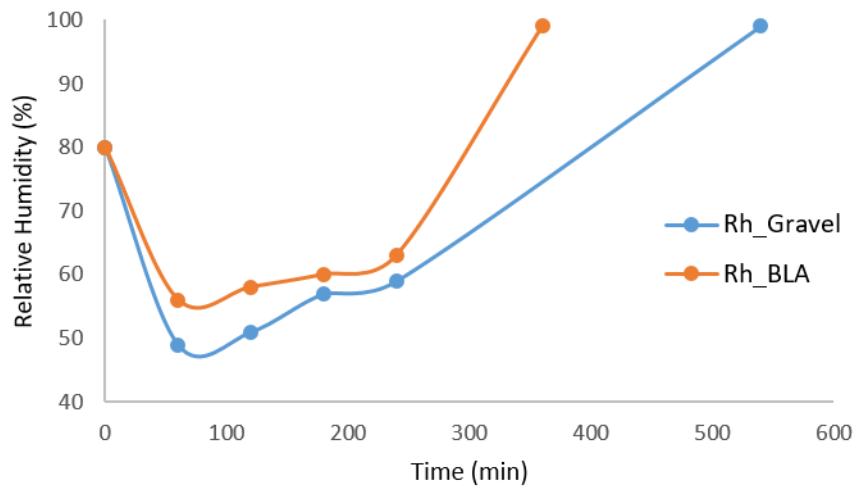


Figure 41. Comparison of relative humidity according to filling material

제 5 장 결론

본 연구는 현재 빗물 관리 시설로 설치되는 침투 시설에 대해 알아보고 침투 시설의 침투 특성과 증발 특성에 미치는 인자에 대해 실내 실험을 통해 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 침투 시설의 기능에 대하여 새로운 디자인을 제안하였다.

1. 실내 침투 실험을 통한 침투 거동 파악

침투 시설에서 침투 특성에 영향을 미치는 인자를 시설 인자인 쇄석, 기후 인자인 유입속도, 토양 인자인 초기함수비에 따른 실험을 수행하였다.

- ① 쇄석에 따른 침투속도 및 침투량은 BLA 가 일반 쇄석인 Gravel 보다는 비교적 높았지만, 깊이가 깊어질수록 그 영향이 감소하였다.
- ② 유입속도에 따른 침투 속도는 유입 속도가 커질수록 침투 속도가 빨라졌지만, 이전 결과와 같이 깊이가 깊어질수록 그 영향이 감소하였다.
- ③ 초기함수비에 따른 침투 속도는 초기함수비가 낮을수록 침투 속도가 빨라졌고, 깊이가 깊어질수록 그 영향이 감소하다가 초기함수비가 최적함수비 이상이 되었을 때 포화 속도가 느려짐을 확인했다.

실험 결과로 알 수 있는 점은 침투 시설의 경우 시설 인자 혹은 강우 인자보다 토양 인자에 따른 영향이 큼을 알 수 있었다. 또한 토양 인자는 토립자의 크기, 공기 유입계수 등 인위적으로 조절 불가능한 인자이므로 침투 시설에 따른 침투 능력 향상보다 다른 기능의 향상을 목적으로 설치되는 것이 바람직하다고 보여진다.

2. 실내 증발 실험을 통한 증발 거동 파악

침투 시설에서 증발 특성에 영향을 미치는 인자를 시설 인자인 쇄석 종류와 쇄석 내 물의 양에 따른 실험을 수행하였다.

- ① 모든 쇄석이 물에 잠긴 saturated condition 에서 쇄석에 따른 증발량은 BLA 가 일반 쇄석인 Gravel 을 적용했을 때와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 이를 통해 계산 된 증발 잠열 flux 또한 그 차이가 미미하거나 일정하지 않았다. 표면 온도와 대기 온도의 경우에도 차이를 보이지 않았다.
- ② 일부 쇄석이 물에 잠기고 중력수의 일부가 배제된 semi-saturated condition 에서 쇄석에 따른 증발량은 BLA 가 일반 쇄석인 Gravel 을 적용했을 때와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 이를 통해 계산 된 증발 잠열 flux 또한 그 차이가 미미하거나 일정하지 않았다. 표면 온도와 대기 온도의 경우에도 차이를 보이지 않았다.
- ③ 중력수가 모두 배제되고 공극 내의 물만 존재하는 unsaturated condition 에서는 증발량, 잠열 flux 모두 BLA 를 적용하였을 때 더 높은 값을 보였다. 또한 대기 온도의 경우 BLA 를 적용하였을 때 낮은 값을 보여 증발을 통하여 주변 대기를 시원하게 한다는

것을 확인하였다. 상대 습도의 경우에도 BLA 가 대기 포화 상태에 더 빠르게 도달하여 증발 속도가 Gravel에 비해 빠르다는 것을 확인했다.

본 연구 결과로 침투 시설의 침투 능력은 인위적으로 그 효과를 증대시키기에 한계점이 존재하며, 증발의 경우 시설의 채석을 내, 외부 공극을 많이 내포하고 있는 골재인 BLA 의 적용을 통해 그 능력을 증대시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 해당 골재의 적용으로 다양한 시설에 열섬 현상 저감을 위한 기능으로서의 사용을 제안한다.

참 고 문헌

- Aboufoul, M. *et al.* (2019) ‘Dynamics of water evaporation from porous asphalt’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 202, pp. 406–414. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.043.
- Cerdà, A. (1995) ‘Soil moisture regime under simulated rainfall in a three years abandoned field in southeast Spain’, *Physics and Chemistry of the Earth*, 20(3–4), pp. 271–279. doi: 10.1016/0079–1946(95)00037–2.
- Jia, H. *et al.* (2017) ‘China’s sponge city construction: A discussion on technical approaches’, *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 11(4), pp. 1–11. doi: 10.1007/s11783–017–0984–9.
- Kim, H. (2018) ‘Evaluation of Rainwater Storage Block Using Recycled Aggregate By-product’, 한국건설순환자원학회 논문집, 6(3), pp. 167–173.
- Kim, K. *et al.* (2010) ‘Production of lightweight aggregates using power plant reclaimed ash’, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 47(6), pp. 583–589. doi: 10.4191/KCERS.2010.47.6.583.
- Kim, Y. Y., Lee, K. K. and Sung, I. H. (2001) ‘Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Seoul area, Korea’, *Hydrogeology Journal*, 9(4), pp. 401–412. doi: 10.1007/s100400100139.
- Lee, B. S. *et al.* (2015) ‘Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility’, *Journal of*

Korean Society of Hazard Mitigation, 14(6), pp. 427–437. doi: 10.9798/kosham.2014.14.6.427.

Lim, H. *et al.* (2015) ‘The study of filtering removal contribution for controlling water bloom and improving water quality in artificial floating island’, in 한국산학기술학회 학술대회논문집, pp. 842–843.

Markovič, G. *et al.* (2014) ‘Rainwater infiltration in the urban areas’, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 181, pp. 313–320. doi: 10.2495/EID140271.

P.christopher, D. M. (1982) ‘Moisture and Heat Transport in Hysteretic, Inhomogeneous Porous Media: A Matric Head–Based Formulation and a Numerical Model’, *Water Resources*, 18(3), pp. 489–498.

Shahraeeni, E. and Or, D. (2010) ‘Pore–scale analysis of evaporation and condensation dynamics in porous media’, *Langmuir*, 26(17), pp. 13924–13936. doi: 10.1021/la101596y.

Shokri, N. *et al.* (2008) ‘Drying front and water content dynamics during evaporation from sand delineated by neutron radiography’, *Water Resources Research*, 44(6), pp. 1–11. doi: 10.1029/2007WR006385.

Yang, Y. K. *et al.* (2017) ‘Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon’, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 122, pp. 411–421. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.015.

김광엽, 허성준, 권영철, 신휴성, 임성빈, 김홍택 (2011) ‘X-ray CT

스캔을 이용한 사질토 간극비 측정’, in 한국지반공학회논문집, pp. 87-97.

박혜진, 문종욱 (2008) ‘회처리장 매립회를 이용한 옥상용 식생블럭 개발에 관한 연구’, in 대한건축학회지회연합회 학술발표대회논문집, pp. 485-488.

서치호 (1991) ‘인공 경량골재의 개발현황과 특성’, 콘크리트학회지, 6, pp. 17-21.

이창수, 최상현, 박종혁김영욱 (2009) ‘인공경량골재 콘크리트의 수분이동 특성에 관한 연구’, in 대한토목학회논문집, pp. 373-384.

이태구 (2016) ‘조립식 저류형 침투시설의 설계 및 공간적용 효과분석’, in 한국생태환경건축학회 논문집, pp. 103-108.

한영해, 이태구 (2012) ‘분산식 빗물관리시설 적용에 따른 증발산 변화 연구 Study on the Changes in Evapotranspiration according to the’, 한국생태환경건축학회논문집, 12(5), pp. 3-10.

Abstract

Urban flood and drought problems caused by the increase in impervious area due to rapid urbanization are raising the importance of rainwater management. As a result, a variety of technologies are being developed. The installation of infiltration facilities is an essential element of rainwater management. The purpose of the infiltration facility is mainly to recharge groundwater, improve the vegetation environment, and reduce the heat island phenomenon through temporary storage.

The existing studies mainly focused on modeling and predicting the groundwater recharge effect of the infiltration facilities on a watershed basis, and studies on other functions studied the effect of the temperature reduction of permeable blocks, a type of infiltration facility. Therefore, this study is to investigate the infiltration behavior of the actual facility by changing aggregate type, which is a factor of infiltration facility itself, and to find a way to maximize the effect of aggregates of the facility through evaporation experiment.

In this study, infiltration experiments were carried out by varying aggregate factor, precipitation factor which is inflow rate and initial water content, which are factors of infiltration facilities, and the infiltration behavior was analyzed. Experimental results show that the infiltration rate and the amount of infiltration vary depending on the type of aggregate type, but the effect is small and the effect of

the infiltration facility is decreased as the depth is deepened. Experimental results according to the inflow rate of the rainfall factor showed the same result. In the case of the initial water content which is the soil factor, the same results were obtained until the water content reached the optimum water content. In the case of evaporation test, the amount of evaporation, latent heat flux, and temperature at the time of saturation or partial saturation of the aggregate were similar in both BLA and gravel. However, in the case of the unsaturated state in which there is no free water and only water in the pore, both the evaporation amount and the latent heat flux of evaporation were high when BLA was used and the value of BLA was low when it was at ambient temperature.

From the results of this experiment, it is found that there is a limit to improve infiltration ability by changing the size of infiltration facilities and the characteristics of facilities such as internal filling materials.

Key words: Infiltration facility, infiltration, evaporation, latent heat, rainwater management

School number: 2017-21274